

VŠB-Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Vliv ne-izokinetiky odběru vzorku na stanovení
koncentrace TZL

Influence of Non-isokinetic Sampling for TSP
Determination

Student: Bc. Roman Kovář
Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Horák, Ph.D.

Ostrava 2011

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Roman Kovář**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Vliv ne-izokinetiky odběru vzorku na stanovení koncentrace TZL**
Influence of Non-isokinetic Sampling for TSP Determination

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte přehled metod stanovení TZL.
2. Navrhněte experimentální zařízení a metodiku pro ověření vlivu ne-izokinetiky odběru vzorku na stanovení koncentrace TZL.
3. Experimentálně ověřte vliv odchylek od izokinetického odběru vzorku na stanovení koncentrace TZL.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ISO 9096 Stacionární zdroje emisí – Stanovení hmotnostní koncentrace a hmotnostního toku tuhých částic v potrubí – Manuální gravimetrická metoda
- [2] ČSN EN 13284-1 Stacionární zdroje emisí - Stanovení nízkých hmotnostních koncentrací prachu - Manuální gravimetrická metoda
- [3] JIROUŠ, F., MARVAN, B. Měření v tepelné technice. Praha: ČVUT, 1981
- [4] RAJNIAK, I. a kol. Tepelno-energetické emisné merania. Bratislava: Svornosť, 1997, ISBN 80-88683-20-3

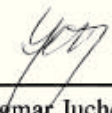
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Horák, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 23.05.2011

.....
Bc. Roman Kovář

Prohlášení

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne2011

Bc. Roman Kovář

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svému školiteli Ing. Jiřímu Horákovi, Ph.D., Ing. Františku Hopanovi, Ph.D. a Zdeňku Kysučanovi, bez jejichž cenných rad a pomoci by tvorba této práce pro mne byla zdlouhavější a náročnější.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KOVÁŘ, R. Vliv ne-izokinetického odběru vzorku na stanovení koncentrace TZL. Ostrava: Katedra energetiky, Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011, 70 s. Vedoucí práce: Horák, J.

Diplomová práce se zabývá tematikou měření tuhých znečišťujících látek. Práce je rozdělena do tří částí. V první části jsou popsány základní vlastnosti tuhých znečišťujících látek, jejich vznik, základní rozdělení a vliv na lidské zdraví. Dále jsou zde popsány základní metody pro stanovení hmotnostní koncentrace tuhých znečišťujících látek. Další část práce je zaměřena na experimentální zařízení, které umožňuje nastavení referenční hodnoty koncentrace tuhých znečišťujících látek a lze jím ověřit správnost měření u jednorázových metod. V závěrečné experimentální části práce je uvedena metodika experimentálního odběru a vyhodnocení vlivu ne-izokinetického odběru vzorku na stanovení hmotnostní koncentrace a hmotnostního toku tuhých znečišťujících látek.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

KOVÁŘ, R. Influence of non-isokinetic sampling for TSP determinativ. Ostrava: Department of Energy, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB – Technical University of Ostrava, 2011, 69 pages. Supervisor: Hrák, J.

This thesis deals with the topic of measurement of particulate pollutants. The work is divided into three parts. The first part describes the basic properties of solid pollutants, their origin, classification and fundamental impact on human health. It further describes the basic methods for determination of the mass concentration of particulate pollutants. The next section describes an experimental device that allows to set the reference concentration of particulate matter and can be used to verify the accuracy of measurements for single methods. In the final experimental part of thesis experimental methods of sampling and evaluating of the impact of non-isokinetic sampling for the determination of the mass concentration and mass flow of particulate pollutants are described.

Obsah

OBSAH.....	1
TERMÍNY A DEFINICE	3
SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ	3
1 ÚVOD	5
2 TUHÉ ZNEČIŠŤUJÍCÍ LÁTKY	6
2.1 Účinek prachových částic na lidské zdraví	8
3 METODY MĚŘENÍ TZL.....	10
3.1 Jednorázové metody stanovení TZL	10
3.1.1 Vzorkovací rovina a vzorkovací body	12
3.1.2 Měřicí aparatura	13
3.1.3 Měření střední rychlosti proudění.....	17
3.1.4 Podmínky odběru.....	20
3.1.5 Způsoby vzorkování.....	22
3.1.6 Postup měření.....	23
3.1.7 Výpočet.....	24
3.2 Kontinuální metody stanovení TZL	24
3.2.1 Optické metody transmisní princip.....	25
3.2.2 Optické metody založené na rozptylu světla.....	27
3.2.3 Radiometrická metoda pohlcování beta záření.....	27
3.2.4 Triboelektrická metoda.....	28
4 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ	29
4.1 Popis funkce zařízení.....	31
4.1.1 Dávkovaný prach.....	31
4.1.2 Dávkovač prachu.....	32
4.1.3 Ejektor	32
4.1.4 Odběrový úsek prašné tratě.....	33
4.1.5 Venturiho trubice.....	33
4.1.6 Zachycovač prachu.....	34
4.1.7 Zdroj sání	35
4.1.8 Stanovení referenční hodnoty koncentrace	35
4.2 Výpočet ejektoru	36

4.2.1 Výpočet vstupních parametrů ejektoru	37
4.2.2 Výpočet entalpií	38
4.2.3 Výpočet dýzy	39
4.2.4 Výpočet směšovací komory	42
4.2.5 Výpočet difuzoru	43
5 NE-IZOKINETICKÝ ODBĚR VZORKU	44
5.1 Odběrová aparatura	45
5.1.1 Parametry odběrové aparatury	46
5.2 Výpočet	46
5.2.1 Výpočet hustoty	47
5.2.2 Výpočet proudění vzdušiny v měřicím profilu	50
5.2.3 Stanovení koncentrace a hmotnostního toku TZL	52
5.2.4 Určení přesnosti měření	53
5.3 Výsledky měření	54
5.3.1 Vliv ne-izokinetického odběru na stanovení hmot. koncentrace TZL	55
5.3.2 Vliv ne-izokinetického odběru na stanovení hmotnostního toku TZL	58
5.3.3 Vyhodnocení měření	60
6 ZÁVĚR	61
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	III
SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ	V
SEZNAM PŘÍLOH	VII
SEZNAM VÝKRESŮ	VII

Termíny a definice

prach: částice libovolného tvaru, struktury nebo hustoty rozptýlené v plynné fázi za určitých podmínek.

vstupní otvor: otvor v potrubí na konci měřicí přímky, kterým se zasouvá vzorkovací sonda.

vzorkovací rovina: rovina kolmá k ose potrubí v místě odběru vzorku.

vzorkovací přímky: přímky ležící ve vzorkovací rovině, na nichž jsou rozmístěny vzorkovací body ohraničené vnitřní stěnou potrubí.

vzorkovací bod: určitý bod vzorkovací přímky, ze kterého je odebírán vzorek.

izokinetické vzorkování: způsob vzorkování, při němž se rychlost a směr plynu v_N vstupujícího do hubice vzorkovací sondy shoduje s rychlostí v_a a směrem proudění plynu potrubím v místě vzorkovacího bodu.

izokinetický poměr: poměr rychlostí v_N/v_a vyjádřená v procentech jako veličina charakterizující odchylku od izokinetického vzorkování.

hmotnostní koncentrace tuhých částic – hmotnost tuhých částic vztažená na jednotku objemu plynu proudícího v potrubí za def. tlaku a teploty.

hmotnostní tok tuhých částic – hmotnost tuhých částic obsažených v plynu proudícím v potrubí vztažená na jednotku času.

normální stavové podmínky: vztažené podmínky pro suchý plyn při tlaku 101,325 kPa zaokrouhleném na 101,3 kPa a termodynamické teplotě 273,15 K zaokrouhlených na 273 K.

Seznam použitého značení

Zde je uvedeno jen základní značení, další značení uvedeno u jednotlivých výpočtů.

Použité značky:

C	hmotnostní koncentrace tuhých částic	[mg/m ³ _N]
K	korekční faktor Prandtlovy sondy	[-]
L	charakteristická délka	[m]

Q_m	hmotnostní průtok	[kg/s]
Q	objemový průtok	[m ³ /s]
S	plocha	[m ²]
T	absolutní teplota	[K]
V	objem plynu	[m ³]
V_a	rychlost plynu vzorku v potrubí	[m/s]
V_N	rychlost v ústí sondy	[m/s]
V_{vz}	odebrané objem vzorku	[m ³]
d	charakteristický průměr	[m]
i	měrná entalpie	[J/kg]
m	hmotnost	[kg]
p	absolutní tlak	[Pa]
p_{atm}	atmosférický tlak	[Pa]
Δp	diferenční tlak	[Pa]
p_{st}	statický tlak	[Pa]
t	teplota	[°C]
w	rychlost	[m/s]
ρ	hustota	[kg/m ³]
τ	čas	[s]
φ	relativní vlhkost	[%]
χ	adiabatický exponent	[-]
ω_i	izokinetický poměr	[-]

Indexy:

N	normální podmínky
v	vlhký stav
s	suchý stav

Zkratky:

ZL	Znečišťující látky obecně
TZL	Tuhé znečišťující látky
AMS	Automatizované měřicí systémy
QAL1	první úroveň prokazování jakosti
QAL2	Druhá úroveň prokazování jakosti
QAL3	Třetí úroveň prokazování jakosti

1 Úvod

Měření emisí tuhých znečišťujících látek patří mezi nejkomplicovanější metodiky analýzy odpadních plynů. Je experimentálně náročné a vyžaduje smysl pro detail. Účelem emisního měření je stanovit koncentraci nebo množství tuhých znečišťujících látek, které se vypouštějí do ovzduší ze spalovacích, technologických nebo jiných procesů.

První část této práce obsahuje rešerši se zaměřením na tuhé znečišťující látky. Obecně popisuje jejich vznik, základní rozdělení a vliv na lidské zdraví. Dále jsou zde uvedeny základní metody stanovení tuhých znečišťujících látek se zaměřením na jednorázovou manuální gravimetrickou metodu, která se používá jako rozhodčí. Jsou zde také popsány základní principy kontinuálních metod pro stanovení tuhých znečišťujících látek.

Další část práce tvoří popis a částečný návrh experimentálního zařízení. Toto zařízení umožňuje nastavení referenční hodnoty koncentrace tuhých znečišťujících látek, množství a rychlost nosného média těchto látek. Hlavní využití tohoto zařízení je v ověření správnosti měření u jednorázových manuálních gravimetrických metod.

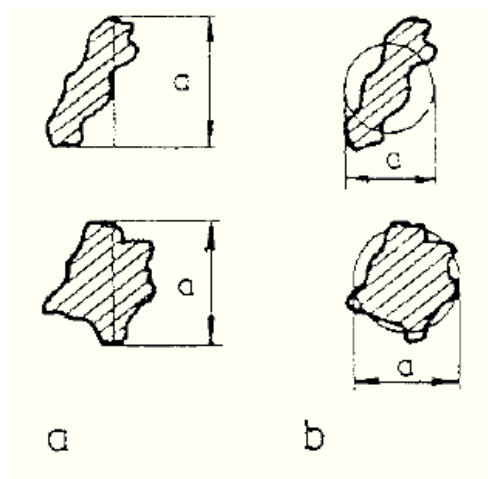
Závěrečná část této práce je zaměřena na experimentální ověření vlivu neizokinetického odběru vzorku na stanovení hmotnostní koncentrace a hmotového toku tuhých znečišťujících látek.

2 Tuhé znečišťující látky

Pojem tuhé znečišťující látky dále jen TZL označuje malé částice tuhých látek, které působí škodlivě na ovzduší. TZL působí negativně ve venkovním i vnitřním ovzduší na zdraví lidí, zvířat, rostlin a snižují životnost staveb a technických zařízení. TZL rozptýlené v ovzduší se rozdělují podle vzniku a složení jako:

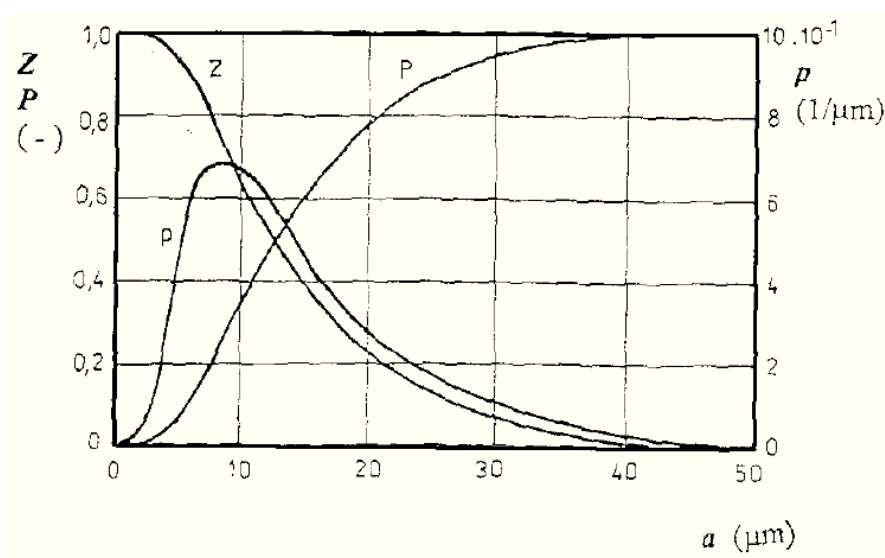
- **Dým** – jemné částice o velikosti 0,1 až 1 μm , které vznikají při oxidačních procesech (např. dým při svařování, tavení kovu) nebo vzniklé plynné fáze chemickými reakcemi.
- **Kouř** – jemné částice 0,01 až 0,5 μm vzniklé nedokonalým spalováním, které obsahují převážně uhlík.
- **Popílek** – je definován velkým rozptylem velikosti částic 1 až 100 μm , vznik především úlet z topenišť spalovacích zařízení.
- **Aerosol** – disperzní soustava jemných částic o velikosti 0,01 až 1 μm v plynu.
- **Prach** – částice vzniklé převážně mechanickým způsobem (drcení, mletí, otěr). V technické praxi se jako prach označují všechny tuhé částice rozptýlené v ovzduší.

Důležitým parametrem TZL je velikost jednotlivých částic, která je základním údajem pro určení granulometrického složení prachu. Jak bylo uvedeno výše, velikost jednotlivých částic se pohybuje ve velmi širokém rozmezí a určuje se podle charakteristického rozměru. Používá se Feretův průměr viz Obr. 1-a [8], který je definován jako největší rozměr částice ve zvoleném směru. Dále se používá např. způsob gratikulárního kruhu viz Obr. 1-b [8], který určuje částici podle průměru kruhu, jehož plocha je nejbližší ploše průměru částice.



Obr. 1 Charakteristické rozměry částic

Jestliže všechny částice daného množství prachu mají stejnou velikost, nazývá se tato směs monodisperzní. Tento případ se obvykle nevyskytuje, proto běžný je výskyt polydisperzních směsí prachu s různými velikostmi částic. Pro popsání polydisperzní směsi je tedy zapotřebí znát kromě celkového rozsahu velikosti částic i jejich poměrné zastoupení. Poměrné zastoupení částic ve směsi se stanoví granulometrickou analýzou a vyjadřuje se obvykle pomocí křivek zrnitosti prachu Obr. 2 [8].



Obr. 2 Křivka zrnitosti prachu

Křivka zrnitosti prachu ve svých jednotlivých bodech znázorňuje:

- **Křivku četnosti p ($1/\mu\text{m}$)** udává poměrný počet částic určité velikosti ve vzorku.

- **Křivka zbytku Z (-)** udává poměrný počet částic větších, než je příslušná velikost částice a.
- **Křivka propadu P (-)** udává poměrný počet částic menších, než je příslušná velikost částice a.

Granulometrická analýza se nejčastěji provádí dvěma základními metodami.

- Metody přímé, které třídí částice podle skutečného geometrického rozměru
 - Optická mikroskopie použití u anizometrických tvarů částic (jehliček, šupinek, destiček)
 - Elektronová mikroskopie, která se používá u velmi jemných prachů v rozmezí velikosti 0,05 do 5 μm
 - Sítování použití pro hrubší frakci > 35 μm
- Metody sedimentační, které třídí velikost částice podle jejich pádové rychlosti v určitém prostředí.
 - Třídění v proudu plynu při využití gravitační nebo odstředivé síly
 - Třídění v kapalině pomocí sedimentace (pipetová metoda, metoda sedimentačních vah) [7],[8]

2.1 Účinek prachových částic na lidské zdraví

Vliv prachových částic na lidský organismus je závislý především na velikosti částic. Částice větší jak 100 μm svou velkou hmotností rychle sedimentují a mají proto malý dopad na zdraví člověka. Mnohem závažnější dopad mají menší částice. Pro svůj značný povrch umožňují slučování a reakce s jinými kapalnými či plynnými znečišťujícími látkami. Tyto částice mohou být podstatně škodlivější (toxické) než samotné TZL. Rozdělení účinků na člověka dle velikosti částic:

- (**<0,01 μm**) tyto částice díky svým nepatrným rozměrům se chovají jako plynné molekuly, klesá jejich retence v plicích a jsou z velké části zpět vydechovány.

- **(0,25-5 μm)** pronikají průduškami až do plicních sklípků patří ze zdravotního hlediska k nejproblematictějším. Inhalace poškozuje kardiovaskulární plicní systém. Dlouhodobá expozice snižuje délku dožití, zvyšuje kojeneckou úmrtnost. Může způsobovat chronickou bronchitidu a chronické plicní choroby.
- **(>5 μm)** jsou při vdechování zachycovány v dýchacích cestách vystlaných řasinkovým epitelem.

Známější rozdělení, které se v praxi užívá:

- **Suspendované částice frakce PM_{10}** – částice, které projdou při odběru vzorku velikostně – selektivním vstupním filtrem vykazující pro aerodynamický průměr 10 μm odlučovací účinností 50%. Jsou to tzv. torakální částice což znamená částice, které vnikají za hrtan.
- **Jemné suspendované částice $\text{PM}_{2,5}$** – částice které projdou při odběru vzorku velikostně selektivním vstupním filtrem vykazujícím pro aerodynamický průměr 2,5 μm odlučovací účinnost 50%.

Prach lze dále rozdělit dle obsahu škodlivých složek do několika skupin:

a) Prach obsahující toxické složky (těžké kovy a jiné biologicky aktivní látky – arsen, berilium, fluor, olovo, rtuť, bismut, radioaktivní látky, karcinogenní látky)

b) Prach bez toxických složek

- Prach s fibrogenním účinkem (křemen, černé uhlí, koks, křemičitany, šamot)
- Prach s možným fibrogenním účinkem (např. slída, saze, svářečský dým)
- Prach bez fibrogenních účinků (hnědé uhlí, vápenec, popílek)
- Prach s dráždivým účinkem (cement, textilní prach, peří, mouka)

Mezi další významné faktory posuzování zdravotního rizika vdechování prachu je mimo jeho koncentraci a velikost také jeho chemické složení. Pokud prach nemá

specifické biologické účinky, hovoříme o prachu inertním, v opačném případě se jedná o prach biologicky agresivní, což má za následek vážná plicní onemocnění.

Prachové částice rozptýlené v ovzduší mohou mít také silný korozivní účinek na materiály. Prachové částice se stávají kondenzačními jádry a mají velký podíl při tvorbě kapiček vody, jsou podkladem pro zvýšený výskyt mlh a mraků v průmyslových oblastech se silným znečištěním ovzduší.

Obsah prachu v ovzduší se udává v hmotnostních koncentracích C (mg/m^3). Ve vnitřním prostředí dle hygienických požadavků se hodnota koncentrace prachu průměrně pohybuje v rozmezí ($0,3 - 10 \text{ mg}/\text{m}^3$). Ve venkovním prostředí, pokud jsou dodrženy imisní limity, nabývá hodnota koncentrace prachu průměrně ($0,05 - 0,2 \text{ mg}/\text{m}^3$). Příklad venkovního městského ovzduší, kde početní koncentrace dosahují přibližně těchto hodnot: částice o velikosti $0,5 \mu\text{m}$: 10^7 částic/ m^3 , částice o velikosti $5 \mu\text{m}$: 10^3 částic/ m^3 . [7],[8]

3 Metody měření TZL

Účelem emisního měření a monitoringu je stanovit koncentraci, nebo množství znečišťujících látek, které se vypouští do ovzduší ze spalovacích, technologických nebo jiných procesů. Měření emisí tuhých znečišťujících látek patří mezi nejkomplikovanější metodiky analýzy odpadních plynů. Je experimentálně náročné a vyžaduje smysl pro detail. Jeho provedení je zpravidla podřízeno splnění základního cíle, kterým je určení hmotnostního toku a hmotnostní koncentrace těchto látek.

3.1 Jednorázové metody stanovení TZL

Základní metodou stanovení TZL je manuální gravimetrická metoda, která se používá jako metoda rozhodčí. Použití této metody se udává v koncentraci od 5 do 10000 mg/m^3 . Obecně platí, že vzorkování tuhých částic je nejproblematictější z analýzy ovzduší. Je to dáno charakterem proudění v uzavřeném profilu, charakterem tuhých částic, vlivem gravitace a dalších faktorů spojených s hmotností částí. Směs proudící uzavřeným profilem a její výslednice sil je ovlivněna větším počtem faktorů a tomu musí být přizpůsobena i technika vzorkování. Přesnost měření je především závislá na izokinetickém odběru vzorku (s odchylkou $\pm 10\%$) a na měřené koncentraci, to znamená čím menší koncentrace tím se dá předpokládat větší nepřesnost.

Pro stanovení obsahu tuhých znečišťujících látek v uzavřených profilech se používá některé z dvojic mezinárodních gravimetrických metod, které jsou založeny na zachycení tuhých částic na vhodných filtrech.

- ČSN ISO 9096 – Stanovení hmotnostní koncentrace a hmotnostního toku částic v potrubí - manuální gravimetrická metoda. Tato metoda se používá pro určení hmotnostní koncentrace od 5mg/m³ do 10g/m³. Pro hmotnostní koncentrace menší jak 50 mg/m³ dohází k nárůstu nejistoty více než $\pm 10\%$. V praxi tyto podmínky nastávají v důsledku kolísání průtoku plynu a hmotnostní koncentrace částic v průběhu vzorkování. Pro spalovací procesy se uvádí celková hodnota odhadu chyby asi 20%. Obecně je vzato, že přesnost je vyšší, čím vyšší je počet měřících bodů. Pokud však jejich počet přesáhne 16, nedochází již k zvýšení přesnosti. V tomto případě lze přesnost zvýšit zvětšením počtu vzorkovacích přímků v potrubí kruhového průřezu. Další možností, jak zmenšit chybu měření je delší doba vzorkování která zmírní důsledky kolísání hmotnostní koncentrace částic v čase.

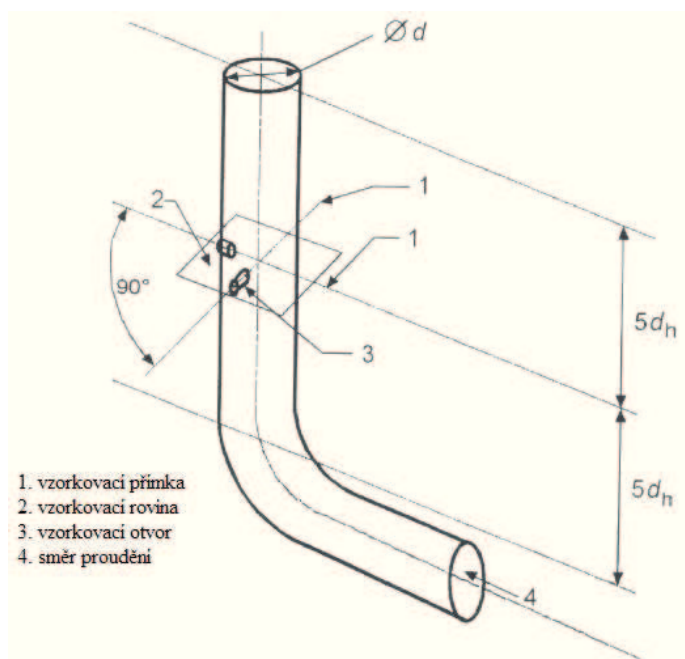
- ČSN EN 13284-1 – Stanovení nízkých hmotnostních koncentrací prachu - manuální gravimetrická metoda. Tato metoda je určena pro stanovení nízkých hodnot hmotnostních koncentrací prachu v plynech proudící potrubím při hmotnostních koncentracích nižších než 50 mg/m³ po přepočtu na normální stavové podmínky. Tato metoda byla ověřena se zvláštním důrazem na obsah prachu okolo 5mg/m³ a průměrnou dobou odběru vzorku 30 min. Tato metoda byla vypracována především pro odpadní plyny ze spaloven odpadu. Obecně ji však lze použít i na jiné stacionární zdroje a vyšší hmotnostní koncentrace. Mez detekce stanovená na základě výsledků jedinou laboratoří činila pro suchý plyn přibližně 0,3 mg/m³ (prach zachycený pouze na filtru). Výzkumy ukázaly, že nejistoty lze omezit na hodnotu menší než 0,5mg/m³. Prodloužením doby odběru vzorku na 60 minut nebo na 90 minut může vést k výraznému zlepšení.

Obě metody představují především referenční metodu pro stanovení TZL emitovanými stacionárními zdroji. Používají se rovněž pro ověření automatizovaných měřících systémů. Nejsou však vhodné pro účely měření ventilačních nebo klimatizačních systémů, vnitřního ovzduší nebo plynů nesoucích kapičky.

Velmi podobný postup měření uvádí mezinárodní norma ISO 12141 pro stanovení nízkých hmotnostních koncentrací v rozsahu do 20mg/m³ se zaměřením na koncentraci částic kolem 5mg/m³. [1][2][14]

3.1.1 Vzorkovací rovina a vzorkovací body

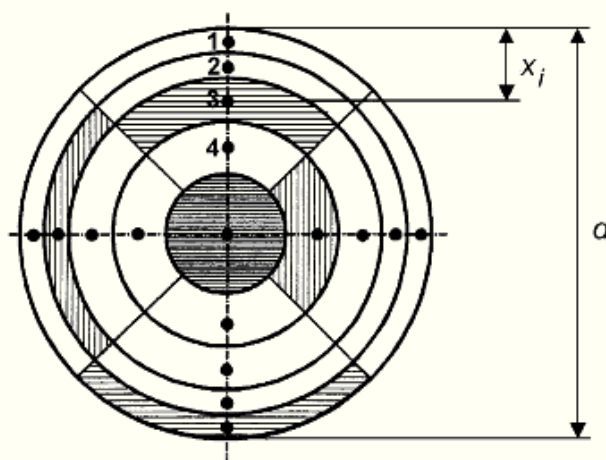
Vzorkovací rovina musí být umístěna v přímém úseku konstantního průřezu potrubí pokud možno ve svislém úseku co možná nejdále po proudu od jakýchkoli překážek, které mohou způsobit turbulence. Pro zajištění dostatečné homogenity distribuce rychlosti plynu ve vzorkovacím profilu by se měla délka tohoto profilu minimálně rovnat sedminásobku hydraulického průměru. Vzdálenost od začátku přímého úseku od měřicího profilu by se měla rovnat minimálně pětinašobku viz Obr 3 [2]. Je-li z hlediska měření možné, měří se na podtlakové straně ventilátoru. Podmínky ve vybraném vzorkovacím profilu je vhodné ověřit orientačním přeměřením rychlostí. Rychlost v profilu by neměla být menší jak 5 m/s



Obr 3 Vzorkovací potrubí kruhového průřezu

Minimální počet vzorkovacích bodů určuje rozměr vzorkovacího průřezu a s rostoucím průřezem jejich počet roste. Plocha měřicího průřezu se dělí na rovnoploché části. Nejmenší vzdálenost vzorkovacího bodu od vnitřní stěny potrubí musí být větší než 3% délky vzorkovací přímky, nebo větší jak 5 cm, uvažuje se větší hodnota. Pro volbu rovnoplochých částí a umístění měřicích bodů v potrubí kruhového průřezu lze použít tzv.

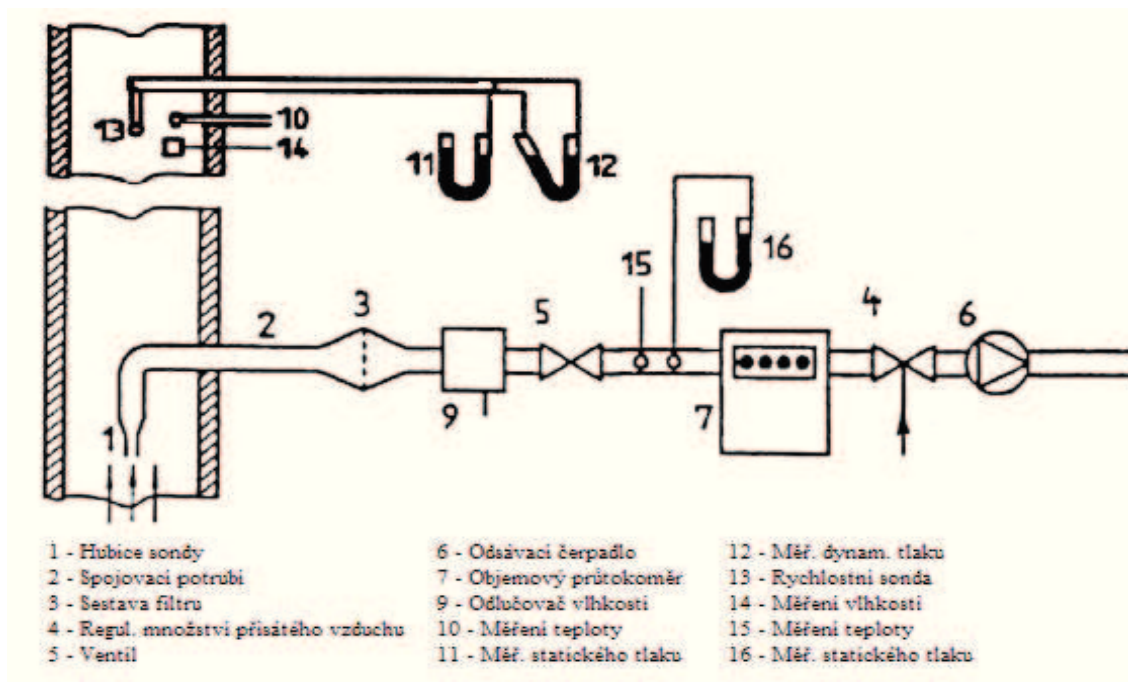
základní metody, kdy jsou vzorkovací body rozmístěny nejčastěji na dvou vzorkovacích přímkách tak, že uprostřed průřezu potrubí je umístěn jeden bod viz Obr 4[2].



Obr 4 Rozmístění vzorkovacích bodů v potrubí kruhového průřezu

3.1.2 Měřicí aparatura

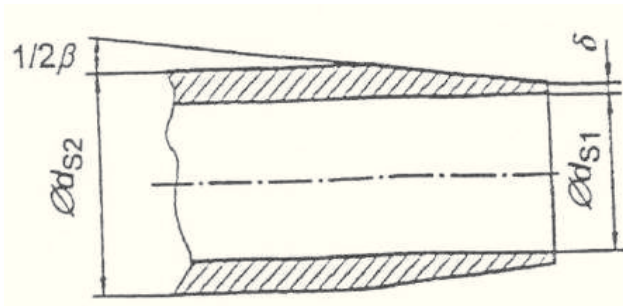
Pro měření TZL se používá mnoho typů měřících aparatur. Jako příklad měřící aparatury je zde uvedena starší sestava, která se stále v mnoho případech používá. Skládá se z následujících součástí dle Obr 5[1].



Obr 5 Příklad sestavy měřící aparatury

Kde:

1. **Hubice sondy:** je součást měřicí aparatury, do které vstupuje vzorek proudícího plynu. Ústí trubice musí mít ostrou hranu, jednoduchý tvar a nesmí obsahovat žádné překážky, které by mohli ovlivnit průběh měření. Z důvodu zaručení mechanické pevnosti musí být dostatečně velká šířka zkosené části stěny hubice. Norma ČSN EN 13284-1 udává minimální vnitřní průměr 6mm. Norma ČSN ISO 9096 udává, že průměr hubice nesmí být menší než 4mm. Další rozměrové změny světlosti z důvodu omezení poruch proudění musí být plynule zaobleny. Všechny ohyby musí být minimálně 1,5 násobkem vnitřního průměru. Z důvodu širokého rozmezí rychlostí v potrubí (např. 3-50 m/s) se užívá různých průměrů hubic. Příklad jednoduchého tvaru hubice je uveden na Obr 6 [3], kde $\beta \leq 20^\circ$ a $\delta/d_{s1} \leq 0,05$ pokud $d_{s2}/d_{s1} \geq 1,1$.



Obr 6 Tvar hubice sondy

2. **Spojovací potrubí:** je součást, která umožňuje zasunout hubici sondy do potrubí. Musí mít hladký povrch a musí být konstruována tak aby umožňovala snadné mechanické čištění. Nejčastěji se vyrábí z korozi-vzdorné oceli. Jeho průměr musí odpovídat stanovenému průtoku, který zajistí dostatečný přívod vzorku a musí být větší jak 4mm. Sonda by měla také umožňovat regulaci teploty z důvodů zabránění kondenzace.
3. **Sestava filtru:** je to zařízení, které slouží k zachytu částic rozptýlených ve vzorku plynu. Sestavu tvoří pouzdro, v němž je umístěn nosič filtru (např. sítko) a filtr. Sestava musí být vyhřívána, čímž se zabrání kondenzaci uvnitř filtru. Teplota v sondě před filtrem a ve filtru by měla být aspoň 15°C nad rosným bodem. Sestava obsahuje filtrační médium, kde nejčastěji je použito plochých filtrů. Účinnost zachytu filtrů pro částici o průměru 0,3 μm musí být větší jak 99,5 %. Tato účinnost musí být zaručena výrobcem. Obecně se používají filtry vyrobené z křemenných,

borokřemičitanových nebo hlinitokřemičitanových vláken. Sestava filtru může být umístěna přímo v potrubí (interní), nebo instalována vně potrubí (externí):

- **Interní filtrace:** je charakteristická co nejkratší vzdáleností mezi hubicí sondy a filtrem. Tímto se omezí ukládání prachových částic na vnitřním povrchu před filtrem. Uložení v ně potrubí však omezuje průměr filtru z důvodu vstupního otvoru potrubí na 50 mm a průtok vzorku ($1-3 \text{ m}^3/\text{h}$). Protože teplota filtrace je obecně shodná s teplotou v potrubí, může v jistých případech, kdy plyn proudící v potrubí obsahuje kapičky vody docházet k ucpávání filtru.
 - **Externí filtrace:** je naznačena na Obr 5. Toto zapojení je charakterizováno dostatečně dlouhou částí spojovací trubky mezi hubicí a filtrem z důvodu snadného přístupu ke všem vzorkovacím bodům v potrubí. Spojovací potrubí a sestava filtru musí být vyhřívány, aby se zabránilo kondenzaci kapiček. Průměr filtru se obvykle pohybuje v rozmezí (50-150 mm) s průtokem vzorku ($1 - 10 \text{ m}^3/\text{h}$).
4. **Regulace množství přisátého vzduchu:** Doporučují se dva regulační prvky (ventil 5 a ventil 4 viz Obr 5), kdy jeden se používá pro jemné nastavení průtoku a druhý jako uzavírací ventil k uzavření toku plynu vzorkovací trati.
6. **Sací čerpadlo:** musí být schopné zajistit maximální vypočtený průtok za podmínek odběru vzorku, kdy tlak na sací straně může například dosahovat tlaků 40 kPa. Čerpadlo musí být plynotěsné a koroziuvzdorné. Nejčastější typy používaných čerpadel jsou membránové, kovové vlnovkové, pístové. Často jsou instalovány s obtokovým ventilem umístěným za čerpadlem. Tímto se prodlužuje životnost čerpadla používá se čerpadlo při nižších průtocích.
7. **Objemový průtokoměr:** Nejčastěji se používají průtokoměry (membránové, bubnové, lopatkové, ultrazvukové). Pro měření proteklého množství plynu lze použít následujících možností:
- **Měření objemu suchého plynu:** kde za sestavou filtru je vložen kondenzátor nebo sušící věž , která umožňuje odstranění vlhkosti na hodnotu menší než 10 g/m^3 při maximálním průtoku vzorku. Dále je zde umístěno plynotěsné

čerpadlo za kterým se nachází membránový plynoměr (s nejistotou menší jak 2%)

- **Měření objemu vlhkého vzduchu:** kde je zapotřebí vyhřívaného spojovacího potrubí, které zabraňuje kondenzaci před filtrem. Následně se provádí měření průtoku (clonové měřidlo) se stupnicí cejchování 2 % předpokládaného průtoku vzorku. Sestava je ukončená čerpadlem a měřením atmosférického tlaku.

9. **Odlučovač vlhkosti:** se instaluje za vyhřívanou sestavu filtru. Nejčastější se používá kondenzátor nebo sušící věž (silikagel). Kondenzátor se může využívat pro měření obsahu vodní páry s přesností určenou chybou do 1%, kde se vychází z hmotnosti kondenzátu a objemu prosátého vzduchu.
10. **Měření teploty v potrubí:** Termočlánek, sonda teploměru s přesností určenou chybou $\pm 1\%$ absolutní teploty.
11. **Přístroj pro měření přetlaku/podtlaku:** Kapalinový manometr, nebo ekvivalentní přístroj s přesností určenou absolutní chybou $\pm 1\%$.
12. **Citlivý manometr pro měření diferenčního tlaku:** Šikmý kapalinový manometr, nebo ekvivalentní přístroj. Chyba těchto manometrů se udává do 5 Pa.
13. **Přístroj pro měření průtoku plynu:** Nejčastěji se používají Prandtlovy trubice. Kalibrace vůči referenční Prandtlově sondě s přesností určenou chybou $\pm 1\%$ rychlosti průtoku.
14. **Přístroj pro měření vlhkosti:** Psychrometr, nebo ekvivalentní přístroj s přesností určenou chybou do $\pm 1\%$.
15. **Měření teploty v plynoměru:** používá se termočlánek, sonda teploměru nebo ekvivalentní přístroj s přesností určenou chybou $\pm 1\%$ absolutní teploty.
16. **Měření statického tlaku:** použití kapalinového manometru nebo ekvivalentní přístroj s přesností určenou absolutní chybou $\pm 1\%$ z tlaku v potrubí

[1][2][3][14]

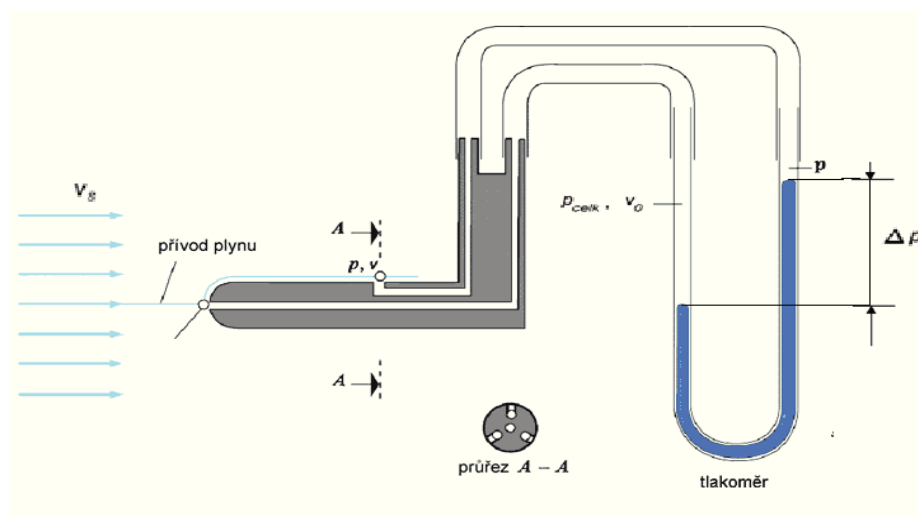
3.1.3 Měření střední rychlosti proudění

Střední průřezová rychlost se vypočítá z lokálních rychlostí měřených v měřících bodech měřícího průřezu. K měření střední průřezové rychlosti proudění se v praxi používá tří typů měřících systémů:

- **Měřidel dynamického tlaku pomocí Prandtlových trubice.**
- **Vrtulkových anemometrů.**
- **Tepelných anemometrů.**

Prandtlovy trubice

Těmito trubicemi se měří tlakový rozdíl, který se nazývá diferenční tlak Δp . Jde o rozdíl mezi celkovým tlakem p_{celk} proudící tekutiny, který zahrnuje i vliv kinetické energie této tekutiny, a statickým tlakem. Statický tlak p_s je definován jako složka celkového tlaku kolmá na směr pohybu proudící tekutiny. Tento tlak má stejnou hodnotu ve všech bodech měřícího profilu a proto jej lze snadno určit viz Obr 7 [15].



Obr 7 Princip měření Prandtlovou trubicí

Diferenční tlak Prandtlovy trubice lze vypočítat ze vztahu:

$$\Delta p = p_c - p_s \quad [\text{Pa}]$$

Z Bernoulliovy rovnice lze odvodit vztah pro výpočet rychlosti proudění w :

$$w = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_c - p_s)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad [\text{m/s}]$$

kde:

ρ skutečná měrná hustota plynu v místě měření [kg/m^3]

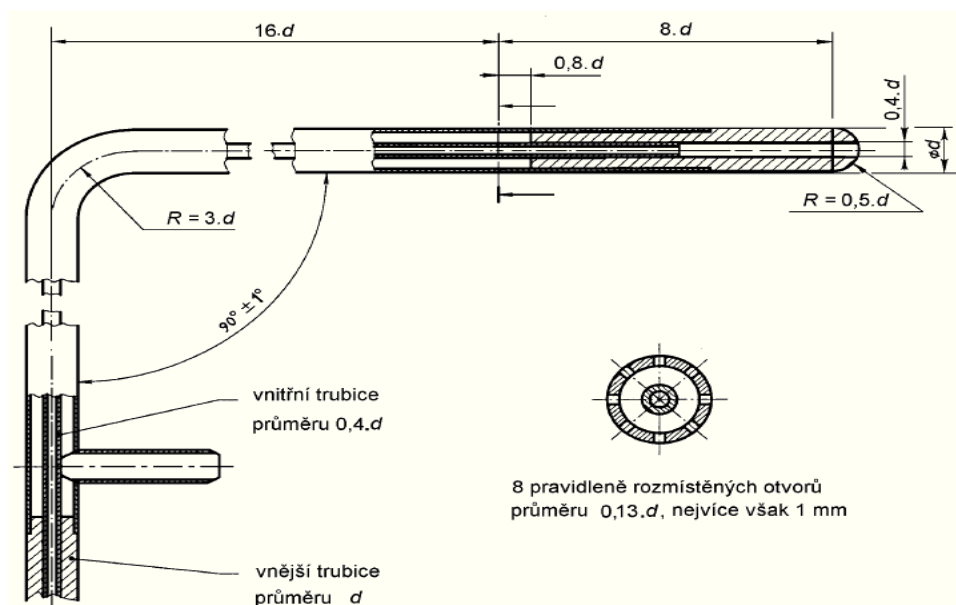
Pro reálná měřidla platí rovnice

$$w = K \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_c - p_s)}{\rho}} = K \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

kde:

K korekční faktor Prandtlovy sondy zjištěný během kalibrace

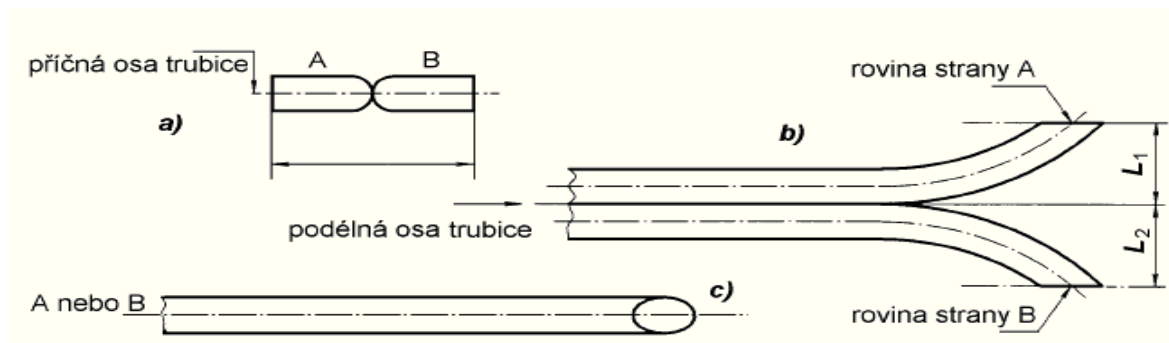
Prandtlovy trubice jsou standardizovány ve dvou tvarech a to typ L a S. Sondy jsou vhodné pro měření rychlosti (5-50 m/s). Základní typ sondy typu L Obr 8 [1] je považován za standardní. Základním požadavkem při měření je rovnoběžnost osy vstupního otvoru s osou kanálu v místě měření. Při odklonu směru proudu o $\pm 5^\circ$ se velikost naměřených hodnot nemění. Tato hodnota je stálá až do odklonu $\pm 15^\circ$. V případě ji-li sonda správně vyrobená je $K=0,99\pm 0,01$ v podmínkách měření $K=1$. Nevýhodou sondy typu L je její délka hlavy což vyžaduje velký otvor ve stěně potrubí. Hodnota nejistoty měření má být menší jak 3%.



Obr 8 Schéma konstrukce Prandtlovy trubice typu L

Prandtlova trubice typu S. Tato trubice byla vyvinuta s cílem omezit problémy spojené ucpáváním a zanášením trubic typu L. Hlavní výhodou je skutečnost, že na

zasunutí do potrubí potřebuje menší otvor jako u typu L. Pokud trubice splňují podmínky na Obr 9 [1], je korekční faktor $K = 0,84 \pm 0,01$. Při měření se sondou typu S nepřekračuje chyba 4%



Obr 9 Schéma konstrukce Prandtlovy trubice typu S

Vrtulkové anemometry

Princip je založen na skutečnosti, že vrtulka anemometru se otáčí rychlostí úměrnou rychlosti proudění plynu, v němž je umístěna. Tato rychlost je téměř nezávislá na hustotě, tlaku a teplotě proudícího plynu. Pro rychlost proudění odpadního plynu platí vztah:

$$w = a \cdot f + b$$

kde:

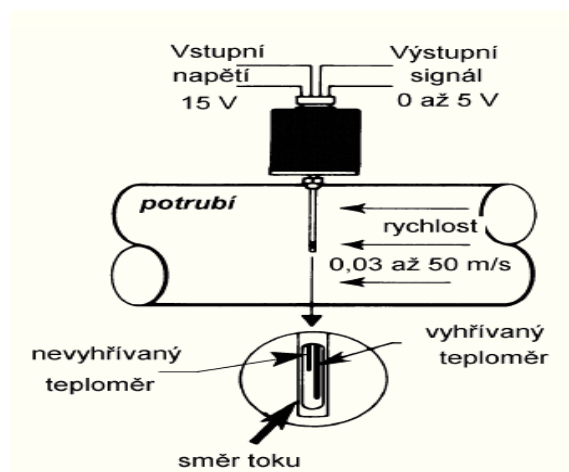
a, b jsou konstanty měřidla a zjišťují se kalibrací

f je frekvence otáčení vrtulky

Typická hodnota měření je 0,4 – 20 m/s. Za optimálních podmínek je celková nejistota měření rychlosti proudění odpadních plynů vrtulkovými anemometry menší jak 5%

Tepelné anemometry

Anemometr je tvořen dvojicí platinových teploměrů. První ve směru proudu měří teplotu proudícího média a druhý je vyhříván tak aby byl udržován konstantní rozdíl mezi oběma teploměry viz Obr 10 [14]. Dle elektrického příkonu P byl odvozen vztah pro proudění plynu:



Obr 10 Schéma konstrukce tepelného anemometru

$$P = k_1 \sqrt{w} + k_2$$

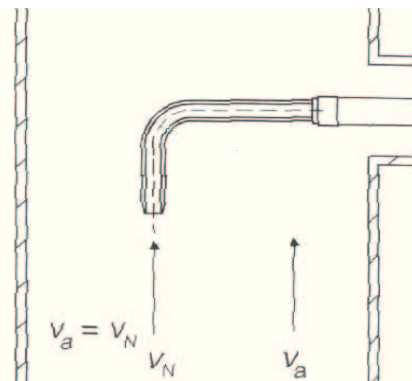
kde:

k_1, k_2 konstanty, které zahrnují vliv teplotních rozdílů, rozměru měřidla a stavové veličiny měřeného média

Výhodou tepelných průtokoměrů je jejich robustnost, použitelnost za vysokých teplot. Nevýhodou je nutnost kalibrace pro určité odpadní plyny. Za optimálních podmínek je celková nejistota měření rychlosti menší než 7%. [1][14][15]

3.1.4 Podmínky odběru

Při měření TZL musí být dodrženy podmínky izokinetiky. To znamená, že odběrová rychlost v ústí sondy se musí rovnat rychlosti sledovaného vzorku v místě odběru viz Obr 11 [2].



Obr 11 Izokinetický odběr

kde:

V_N rychlost v ústí sondy

V_a rychlost proudu vzorku v potrubí

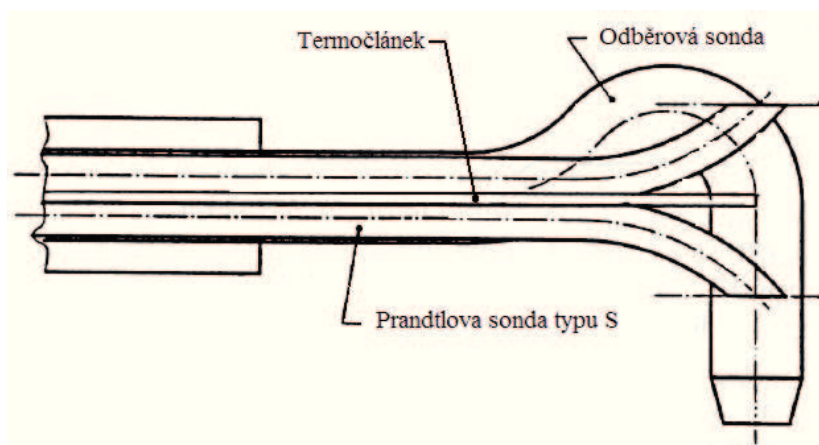
V případě dodržení izokinetického poměru ω_i se bude rovnat:

$$\omega_i = \frac{V_N}{V_a} = 1$$

Pokud se izokinetický poměr liší o více jak -5% až +15% považuje se toto měření za neplatné. V případě, že je odběrová rychlost větší odebírá se menší množství tuhých látek než je skutečná koncentrace těchto látek v daném místě. To stejné platí i v opačném případě. Nedodržení podmínek izokinetiky má také důsledek na výslednou granulometrii odebraného vzorku. V případě, že je odběrová rychlost větší, vyskytuje se v odebraném vzorku větší podíl jemných frakcí, než odpovídá skutečné granulometrii. Pro zabezpečení izokinetického odběru se například používá těchto systémů:

- Dvou Prandtlových sond, kde první sonda je umístěna nad odběrovou sondou v její ose a druhá sonda je umístěna co nejbližší odběrové sondě a jejich ústí jsou v jedné rovině. Obě Prandtlovy sondy jsou propojeny s elektronickým manometrem, který sleduje tlakovou diferenci obou sond a reguluje množství odsátého vzorku.
- Měření statického tlaku ve vnitřním potrubí odběrové sondy a v potrubí v místě odběru vzorku.
- Kombinace odběrové sondy s Prandtlovou sondou typu S a termočlánkem viz Obr 12. Kde se vyhodnocuje pomocí automatické elektroniky rychlost v každém měřicím bodě.

[1][2][3]



Obr 12 Kombinace S sondy odběrové hubice a termočláнку

3.1.5 Způsoby vzorkování

Odběr se provádí podle dvou metod a to:

- **Kumulativní vzorkování**, kde po dokončení vzorkování tuhých částic v prvním měřicím bodě se ústí hubice sondy rychle přesune do druhého měřicího bodu, aniž by se sonda vyjmula z otvoru v potrubí. Takto se opakuje tento postup ve všech měřicích bodech. Odsátý vzorek se ze všech bodů kumuluje na jednom filtru. Tímto způsobem je možné stanovit průměrnou koncentraci v potrubí, ale ne koncentrační profil.
- **Přírůstkové vzorkování**, kde se v každém vzorkovacím bodě použije nový filtr. Tedy po vzorkování v prvním bodě se uzavře uzavírací ventil. Hubice sondy se vysune ven z potrubí a vyjme se filtr. Takto se opakuje tento postup ve všech měřicích bodech. Výsledkem je koncentrace v jednotlivých bodech. Z důvodu dostatečného zachytu tuhých částic na filtru je nutná delší doba odběru. Přírůstkové měření je vhodné při vyhodnocování homogenity koncentračního pole například u vstupu do odlučovačů prachu, práškovou atd. Za odlučovači je prakticky nerealizovatelný z důvodu časové náročnosti.

[1]

3.1.6 Postup měření

Před vlastním měřením je důležité provést správnou přípravu. Tato příprava začíná správnou volbou materiálu filtru. Filtr se před měřením vysuší v muflové peci při teplotě 110 °C a dá se vychladit do exsikátoru s náplní vysoušedla, následně se zváží na analytických vahách s přesností alespoň 0,01mg. Výsledek se zaznamená a zvážený filtr umístěný v Petriho misce se vloží zpět do exsikátoru.

Následně se připraví vzorkovací trať. Jednotlivé části vzorkovací tratě musí být očištěné, provádí se také kontrola jejich funkčnosti. Po sestavení vzorkovací tratě proběhne zkouška těsnosti a to tak, že se uzavře ústí hubice a spustí se čerpadlo. Na průtokoměru se kontroluje zda je trať těsná. Příslušné součásti vzorkovací tratě se předejde na požadovanou teplotu. Sonda se zasune do potrubí na pozici prvního vzorkovacího bodu s ústím hubice obráceným k směru proudu v sledovaném potrubí. Po uzavření vstupního otvoru se ústí hubice pootočí, tak aby ústí hubice směřovalo proti směru proudu s maximální odchylkou odklonu od osy $\pm 10\%$. Nyní se otevře uzavírací ventil, spustí čerpadlo a nastaví požadovaný izokinetický poměr. Doba odběru ve vzorkovacích bodech musí být stejná a předem stanovená. Během celého odběru se kontroluje a upravuje průtok pro splnění daného izokinetického poměru. Během přesouvání ústí hubice do dalšího vzorkovacího se odběr vzorku nepřerušuje. Po přesunutí se ihned nastaví požadovaný izokinetický poměr. Po dokončení odběru ve všech bodech se uzavře ventil, zastaví čerpadlo a vysune měřicí aparatura z potrubí. Vzorkovací trať se rozebere a proběhne kontrola filtru, zda nedošlo při měření k jeho poškození. Nepoškozený filtr se vyjme a vloží do Petriho misky a následně uloží do exsikátoru. Je-li požadováno, provádí se oplach všech součástí vzorkovací tratě před filtrem. Tento oplach se dále zpracovává a přičítá k hmotnostní koncentraci tuhých částic.

Odebrané filtry se přemístí do laboratoře a vloží se do sušárny vyhřáté na 110°C po dobu min 2 hod, potom se vloží opět do exsikátoru kde chladnou na teplotu okolí minimálně 30 min. Následně se zváží a jsou porovnány s hmotností filtrů před a po měření.

[1][2][3]

3.1.7 Výpočet

Přepočet odebraného objemu vzorku V_{vz}^v [m_{nv}^3] na normální podmínky:

$$V_{vzn}^v = V_{vz}^v \cdot \frac{p}{101325} \cdot \frac{273,15}{T}$$

kde:

p absolutní tlak na vstupu do průtokoměru [Pa]

T teplota na vstupu do průtokoměru [K]

Výpočet odebraného vzorku přepočteného na vlhký stav V_{vzv}^v [m_{nv}^3]

$$V_{vzv}^v = V_{vzn}^v + \frac{m_k}{0,804}$$

kde:

m_k hmotnost zachyceného kondenzátu [kg]

0,804 hustota vodní páry ve stavu ideálního plynu normální podmínky [kg/m^3]

Výpočet odebraného vzorku suchý stav V_{vzn}^s [m_{ns}^3]

$$V_{vzn}^s = V_{vzn}^v \cdot \left(1 - \frac{p_p''}{p}\right)$$

kde:

p_p'' parciální tlak syté vodní páry

[1]

3.2 Kontinuální metody stanovení TZL

Kontinuální měření TZL se používá především pro monitoring emisí velkých stacionárních zdrojů znečištění ovzduší. Pro toto měření se využívá automatizovaných měřících systémů dále jen AMS, které pracují na řadě různých fyzikálních principů. AMS pro měření TZL jsou především založeny na metodě optické (transmise, rozptyl světla), triboelektrické a pohlcování beta záření. Volba typu AMS pro konkrétní podmínky nemusí být jednoduchá a musí splňovat určité požadavky. Umístění AMS pro měření prachu bývá v provozu za odlučovači prachu. Kontinuální měření také umožňuje širší význam,

například poskytuje údaje pro modelové výpočty imisní situaci v dané oblasti. Z hlediska samostatné realizace kontinuálního měření lze rozdělit AMS na tyto kategorie:

- využívající extraktivní metody, kde se odběrovou sondou odebere vzorek analyzovaného plynu a proces analýzy se uskuteční mimo místo odběru podobně jako gravimetrická metoda.
- využívající metody tzv. in-situ, kde snímací část prachoměru je umístěna přímo v monitorovaném plynu. Do této kategorie patří metody optické a triboelektrické.

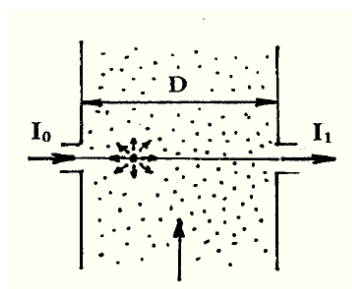
AMS spadají pod normu ČSN EN 14181, kde jsou popsány postupy prokazování jakosti pro splnění požadavků hodnot nejistot stanovené legislativou. Pro splnění těchto požadavků jsou stanoveny tři rozdílné úrovně prokazování jakosti. QAL1, QAL2 QAL3. Tyto úrovně slouží k určení vhodnosti daného AMS k měření (např. před nákupem nebo v průběhu pořizování), validaci po jeho instalaci a k řízení během provozu ve zdroji znečišťování ovzduší. Dále tato norma uvádí postup ročního ověření AMS.

Pro měření obsahu prachu ve spalínách u velkých stacionárních zdrojů, především pak spaloven odpadu byla vypracována norma ČSN EN 13288-2, kde jsou také popsány postupy prokazování jakosti. Dále tato norma určuje specifické požadavky pro měření emisí prachu ze zařízení, které splňují emisní limit menší než 50 mg/m³ v odpadním plynu vedeném potrubím.

[1][14][3]

3.2.1 Optické metody transmisní princip

Při průchodu elektromagnetického záření v rozsahu viditelné ($\lambda=400-750\text{nm}$) a UV částí ($\lambda<400\text{nm}$) spektra proudem plynu s obsahem tuhých částic dochází k zeslabení intenzity záření v přímém směru vlivem rozptylu a absorpce viz. Obr 13 [16].



Obr 13 Princip optické metody

Vycházíme z Lambert-Beerova zákona, kde I_0 [W/m²] je intenzita vysílaného paprsku a I_1 [W/m²] intenzita zeslabeného paprsku. Potom rozdíl těchto intenzit je úměrný koncentraci tuhých částic.

$$\frac{I_1}{I_0} = e^{(-k \cdot C_M \cdot L)}$$

kde:

k extinkční koeficient závislý na vlastnosti částic a vlnové délce [m²/kg]

C_M střední hmotnostní koncentrace po délce paprsku [kg/m³]

L efektivní délka paprsku [m]

Dále je zde zaveden pojem Transmittance T , který znamená průchodnost záření.

$$\frac{I_1}{I_0} = T$$

Pojem Absorbance A který znamená neprůchodnost záření.

$$\ln \frac{I_1}{I_0} = A$$

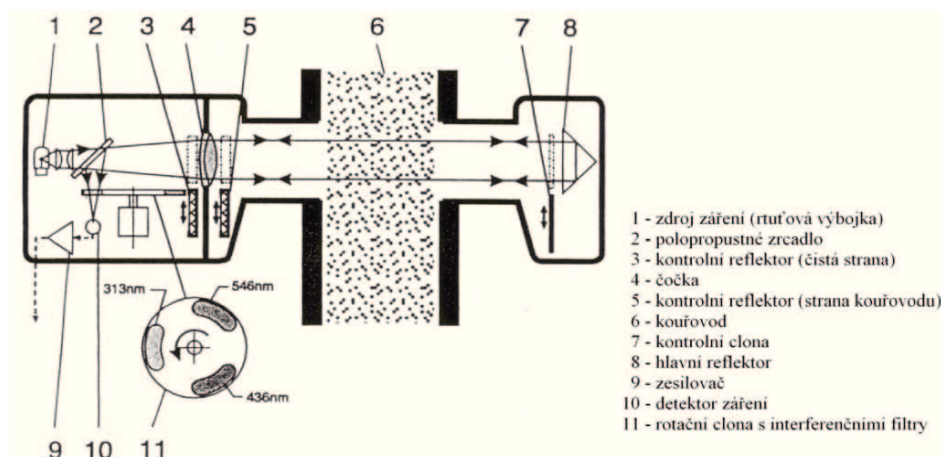
Z těchto rovnic uvedených výše dostaneme vztah pro výslednou koncentraci C_M .

$$C_M = \frac{A}{k \cdot L} = \frac{-\ln \cdot T}{kL}$$

Vlastní přístroje pracují na principu zeslabení světla v přímém směru, kde délka paprsku L je rovna průměru potrubí D a nebo $2D$ kdy snímač a vysílač je na jedné straně. Přístroje mohou být jednopaprskové, nebo složitější vícepaprskové, kdy se jeden paprsek využívá jako referenční. Jako zdroj záření se používá nízkonapěťová žárovka, výbojky, LED diody atd. Volba zdroje záření souvisí s určitou monitorovanou znečišťující složkou.

Fyzikální princip optické metody je nepřímý je tedy důležité signálu o určité intenzitě přiřadit kalibračním gravimetrickým měřením danou koncentraci. Příklad přístroje na měření optickou metodou jen na Obr 14 [16], kde nejznámější výrobce těchto přístrojů je firma SICK.

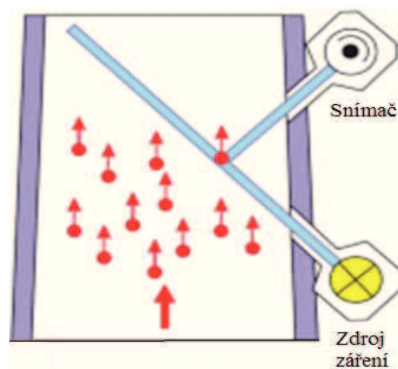
[1][16]



Obr 14 Přístroj na měření koncentrace optickou metodou

3.2.2 Optické metody založené na rozptylu světla

Princip metody spočívá v tom, že zdroj záření vysílá paprsek, který je částicemi prachu v proudu plynu částečně zpětně odražen a snímán citlivým snímačem viz. Obr 15 [18]. Při srovnávání vysílaného a rozptýleného paprsku je možné určit koncentraci prachu ve sledovaném plynu. Jako zdroj záření se používá LED diody, laser nebo jiné zdroje s širokým spektrem vlnových délek. Tato metoda obecně pokrývá rozsah hmotnostní koncentrace v rozmezí $(0,1 - 200 \text{ mg/m}^3)$. [18]

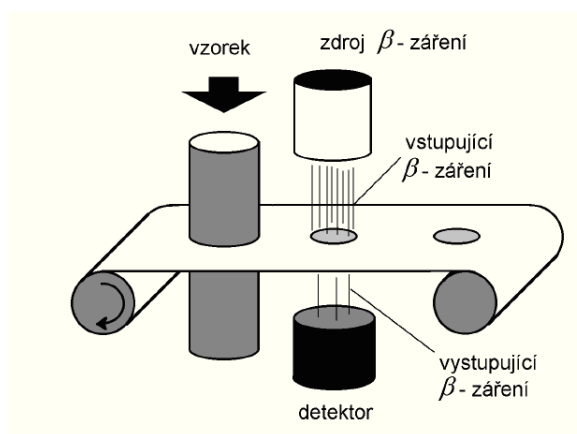


Obr 15 Princip měření rozptylem světla

3.2.3 Radiometrická metoda pohlcování beta záření

Metoda je založena na měření změn intenzity beta záření, které prochází vrstvou zachycených částic na vhodně upravených filtrech viz. Obr 16 [14]. Měření je možno charakterizovat jako kvazikontinuální, neboť se skládá z časového úseku pro odběr vzorku a časového úseku pro vyhodnocení měření. Odebraný vzorek se přivádí do detektoru, kde

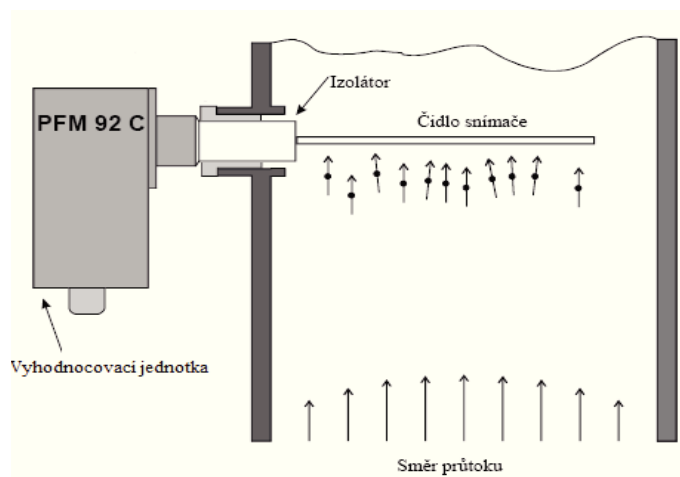
je prosáván páskovým filtrem. Po odběru vzorku, jehož doba je dána v závislosti na koncentraci a průtoku se filtrační pás posune tak, aby záření ze zdroje procházelo postupně exponovanou a neexponovanou částí filtru. Tímto se zabrání vlivu pozadí. Počet detekovaných beta částic lze zachytit Geiger-Müllerovou trubicí tj. počítačem beta částic. Jedná se o metodu měření s odběrem v jednom bodě, musí být známa koncentrace v tomto bodě a střední koncentrace v celém průřezu. Tyto koncentrace se stanovují gravimetrickou metodou. [14][16]



Obr 16 Princip radiometrické metody

3.2.4 Triboelektrická metoda

Princip měření spočívá v triboelektrickém jevu, kde se měří změna elektrického náboje způsobená letícími prachovými částicemi v proudu plynu, které dopadají na povrch vodivé kovové sondy. Příklad prachoměru PFM 92 od německé firmy Dr. Födisch viz Obr 17 [17], který se skládá z kovové izolované sondy a elektronické vyhodnocovací jednotky. Změna elektrického náboje je převáděna na stejnosměrný proudový signál, který je zesílen. Výstupním signálem je proudová smyčka 4-20 mA. Výhodou těchto systémů je okamžitá odezva, jednoduchá instalace a minimální poruchovost. Před zapojením tyto systémy vyžadují přiřadit určité měřené hodnotě absolutní koncentraci prachu. To lze dosáhnout na základě kalibrace gravimetrickou metodou [17]

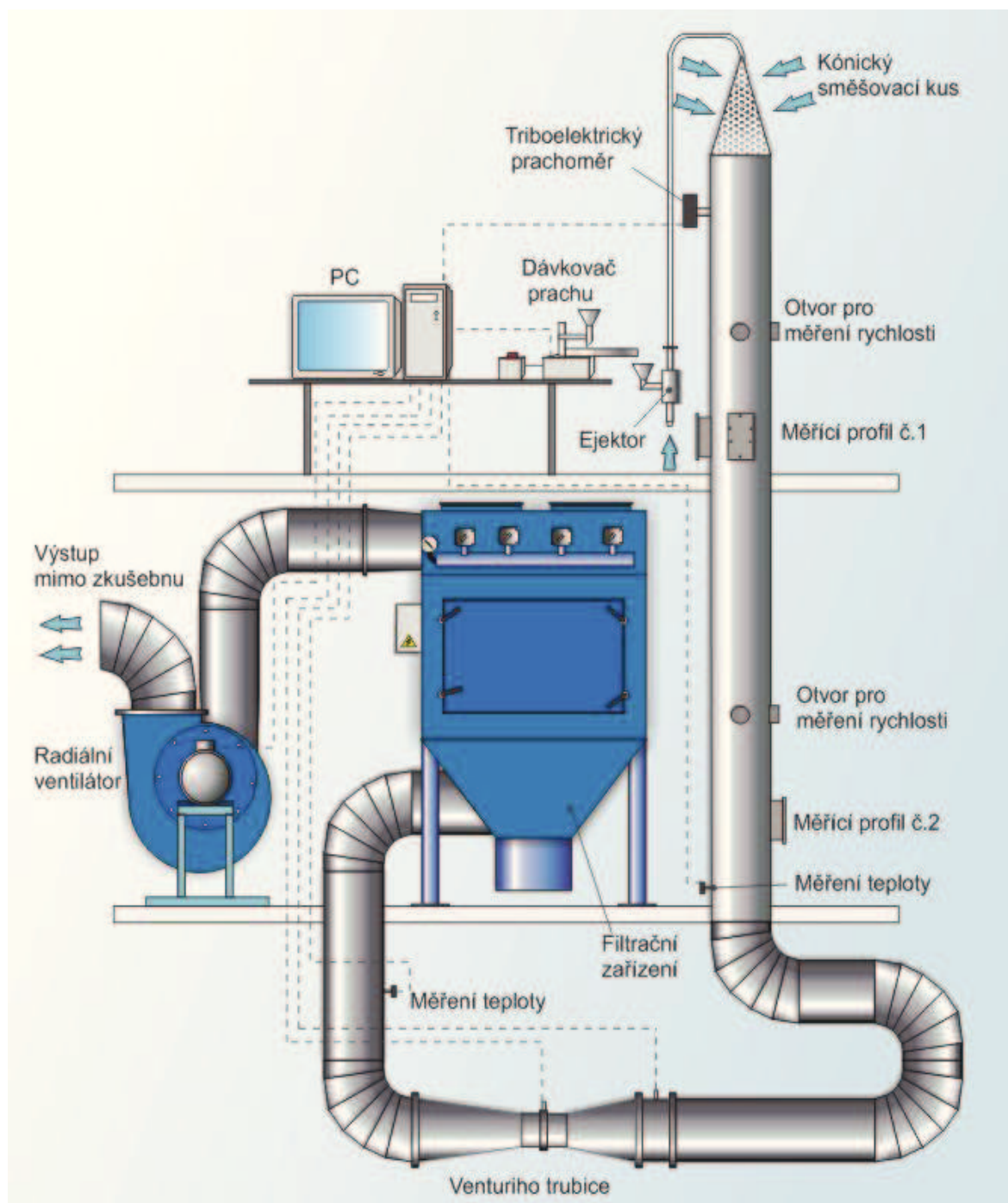


Obr 17 Schéma zapojení triboelektrického prachoměru

4 Experimentální zařízení

Na Výzkumném energetickém centru, které je vysokoškolským ústavem VŠB-TUO se nachází otestované experimentální zařízení dále jen prašná trať viz Obr 18, které umožňuje nastavení referenční hodnoty hmotnostního toku TZL. Důvodem vybudování prašné tratě bylo ověření způsobilosti laboratoří. Mezilaboratorní porovnávací zkoušky spočívaly ve stanovení hmotnostní koncentrací TZL v emisích a stanovení rychlosti proudění plynu v potrubí. Základní parametry prašné tratě jsou: [10]

- Hmotnostní tok TZL (25 - 2500 g/h)
- Střední koncentrace TZL v měřících profilech ($5 - 500 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$)
- Střední rychlost vzdušiny v měřícím profilu (5 - 20 m/s)



Obr 18 Schéma prašné trati

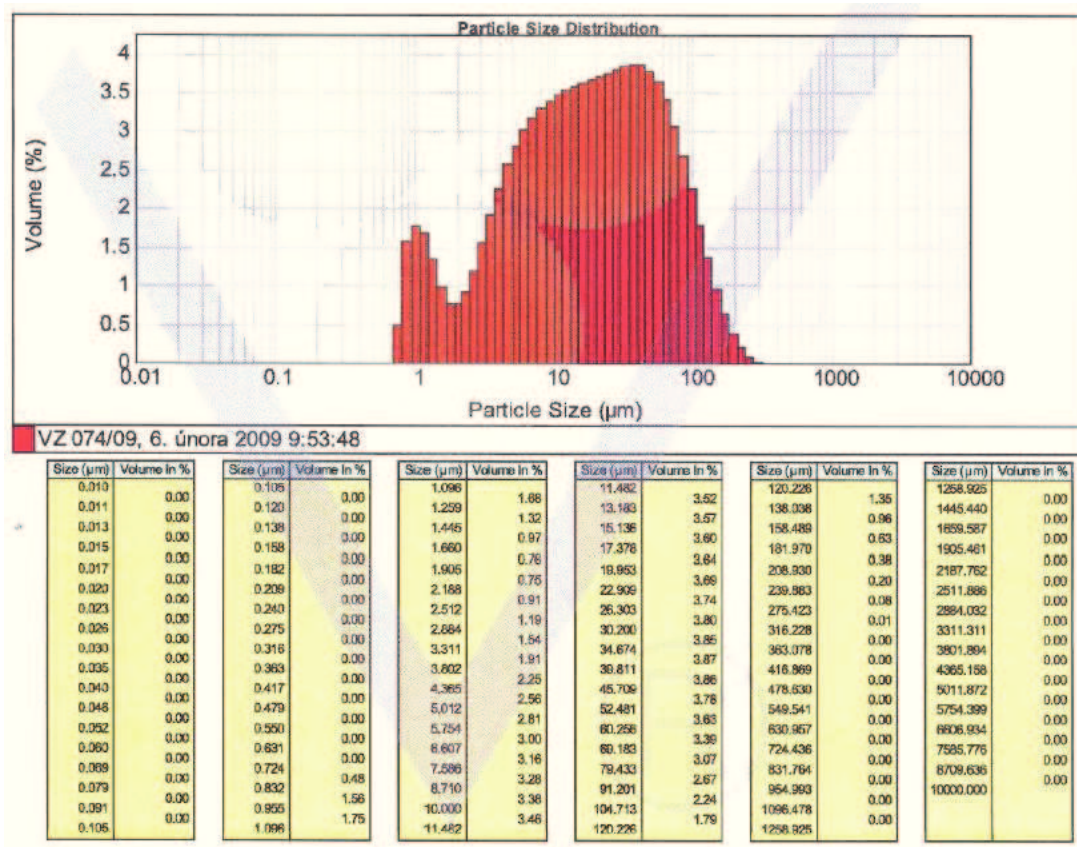
4.1 Popis funkce zařízení

Koncentrovaná aerodisperzní směs prachu se připravuje pomocí vibračního dávkovače, který sype prach do násypky. Násypka ústí do sacího potrubí proudového kompresoru. Prach je zde nasáván společně se vzduchem a následně dochází ke smíchání proudů nasávaného a pracovního média ve směšovací komoře. Pracovní médium proudového kompresoru je stlačený vzduch. Takto vytvořená směs je dále pneumaticky dopravována potrubím o průměru 20 mm do kónického směšovacího kusu, který je vyroben z perforovaného plechu. Zde je směs prachu opět naředěna množstvím přísátého vzduchu a vstupuje do odběrového úseku prašné tratě. Odběrový úsek je tvořen z vertikálního nerezového potrubí o průměru 313 ± 2 mm a délce necelých 7 m. V tomto úseku se nachází dvě nezávislé odběrové stanoviště umožňující reprezentativní odběr vzorku směsi pro stanovení střední koncentrace TZL. Směs prachu, která projde odběrovým úsekem pokračuje pod úroveň podlahy potrubím přes Venturiho trubici (měření objemového průtoku směsi) až do filtračního zařízení, kde dochází k separaci prachu. Takto odseparovaná vzdušina pokračuje z filtračního zařízení do ventilátoru, který představuje zdroj sání pro celou prašnou trať. Vzdušina je následně z ventilátoru vyústěna mimo prostory zkušebny.

[10][11][12]

4.1.1 Dávkovaný prach

Jako dávkovaný prach je použit popílek zachycený v elektrostatickém odlučovači za kotlem spalující černé uhlí ve výtavném ohništi. Příklad použitého prachu s granulometrickým rozbořem je vz. 074/09 uveden na Obr 19 [12], kde procentuální zastoupení ční pro $d(0,1)$ -2,454 μm ; $d(0,5)$ -17,78 μm ; $d(0,9)$ -80,614 μm ; d_{50} -38,416 μm .



Obr 19 Granulometrický rozbor popílku

4.1.2 Dávkovač prachu

Jedná se o vibrační korýtkový dávkovač od firmy FRITSCH typ 24 se žlábkem ve tvaru V. Rozsah dávkování se pohybuje v rozmezí 45 – 2400 g/h. Tento dávkovač je rovnoměrně automaticky regulován, kde řídicí veličinou je výstupní proud 4-20 mA z triboelektrického kontinuálního prachoměru, který je umístěn v horní části odběrového úseku prašné tratě. K regulaci dochází zapnutím a vypnutím vibračního dávkovače prachu. Tato regulace pracuje jen v úzkém rozmezí a je zapotřebí při měření osobně kontrolovat množství dávkovaného prachu a dle potřeby měnit amplitudu vibrace. [10]

4.1.3 Ejektor

Jde o proudový kompresor, který slouží k nasávání vzduchu a prachu dávkovaného z vibračního dávkovače. Dále umožňuje homogenizaci prachu ve směřovací komoře a slouží k dopravě směsi do kónického směřovacího kusu. Jedná se o dopravu

pneumatickou, kde z důvodu usazování prachu je dolní hranice rychlosti směsi v potrubí cca 16 m/s. V kapitole 4.2. je realizován návrh a výpočet ejektoru. [10]

4.1.4 Odběrový úsek prašné tratě

Odběrový úsek trati začíná v horní části kónickým směřovacím kusem vyrobeným z perforovaného plechu o světlosti cca 40%. Směřovací kus ve tvaru kužele má vrcholový úhel 25° a výšku 665 mm. Směřovacím kusem se přisává okolní vzduch (1500 až $5600 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$) a dochází tímto k mísení a vytvoření rovnoměrného koncentračního profilu TZL v následujícím odběrovém úseku prašné tratě. Celý odběrový úsek je tvořen vertikálním vzduchotechnickým potrubím s třídou těsnosti 2 z nerezového materiálu o průměru 315 mm a výšce necelých 7 m. V horní části za směšovacím kusem ve směru proudu směsi TZL je umístěn triboelektrický prachoměr, který spolupracuje s dávkovačem prachu. Za tímto prachoměrem se nachází první ze dvou měřících stanovišť pro odběr vzorku. Každé ze stanovišť je vybaveno dvěma měřicími otvory, které jsou tvořeny ze standardní obdélníkové příruby o velikosti 200 x 100 mm a dvěma otvory pro Prandtlovu sondu. Obě měřící stanoviště jsou navržena tak, aby nedocházelo k jejich vzájemnému ovlivňování při měření. Jako poslední zařízení vertikálního odběrového úseku je měření teploty pomocí odporového teploměru Pt 100. Odběrový úsek je fixován vlastní nosnou konstrukcí, která má podobu žebříku a umožňuje tak snadný přístup pro obsluhu.

[10][11][12]

4.1.5 Venturiho trubice

Pro měření objemového průtoku je v spodní části pod úrovní podlahy nainstalovaná Venturiho trubice ϕ 300 mm, která umožňuje stanovení referenční hodnoty průtoku a tím i střední rychlost v prašné trati s nejistotou do 0,5%. Venturiho trubice je zařízení, sestávající ze vstupního kuželovitého konfuzoru připojeného k válcovitému hrdlu, které je připojeno ke kuželovité rozšiřující se části, nazývané difuzor viz. Obr 20 [5]. Princip metody měření spočívá v měření rozdílu statických tlaků mezi předním úsekem a hrdlem Venturiho trubice.

Hmotnostní průtok se určí z rovnice:

$$Q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{2\Delta p \rho_1} \quad [kg/s]$$

kde:

β poměr průměrů d/D [-]

ε součinitel expanse [-]

C součinitel průtoku [-]

ρ_1 hustota media při dané teplotě a tlaku [kg/m^3]

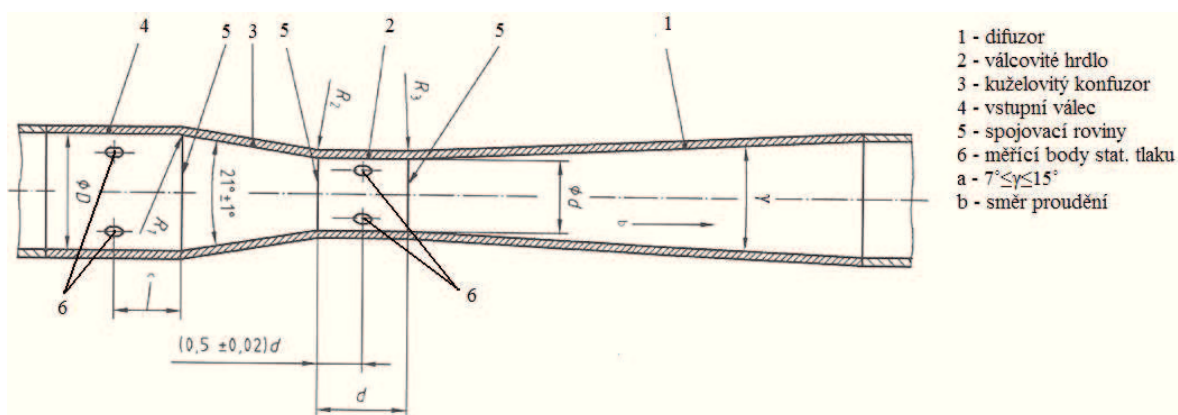
Δp rozdíl statických tlaků [Pa]

Objemový průtok pak lze vypočítat jako:

$$Q = \frac{q_m}{\rho} [m^3/s]$$

kde:

ρ hustota protékajícího media [kg/m^3]



Obr 20 Venturiho trubice

[5][10][11]

4.1.6 Zachycovač prachu

Při průchodu směsi Venturiho trubicí je tato směs vzdušiny s nadávkovaným prachem vedena do zachycovače prachu, ve kterém dochází k separaci nadávkovaného prachu. Jedná se o průmyslový filtr typové řady FH s pulzní regenerací od firmy Rayman.

Filtr obsahuje 16 textilních filtračních patron, které jsou regenerovány tlakovým vzduchem (o přetlaku 0,4 - 0,6 MPa) na základě nastavených časových cyklů, nebo při dosažení zadané tlakové ztráty. Regenerace tlakovým vzduchem je realizována pomocí elektropneumatických ventilů, kdy je na určitou dobu zcela zastaven a otočen proud vzdušiny a vlivem postupné vlny se celá patrona dokonale zregeneruje. Odstraněný prach z patron je gravitační silou dopraven do výsypky, kdy po ukončení zkoušek na prašné trati může být znovu požit. [19]

Tab 1 Parametry zachycovače prachu

Technické parametry	
Odtahové množství (špičkově/trvale)	5000/4000 m ³ _N /h
Vstupní koncentrace	max. 5 g/m ³
Výstupní koncentrace	do 20 mg/m ⁴
Provozní tlaková ztráta	1200 - 1600 Pa
Příkon vlastního filtru	0,1 kW
Teplota vzdušiny	+10 až +40°C

4.1.7 Zdroj sání

Na zachycovač prachu navazuje zdroj sání pro celou prašnou trať a to radiální ventilátor Nederman NCF 80/60 od firmy Nederman. Regulace ventilátoru je pomocí frekvenčního měniče. Otáčky ventilátoru jsou měněny v závislosti na dynamickém tlaku měřeném ve Venturiho trubici. Z důvodu hlučnosti na pracovišti je ventilátor umístěn v akusticky izolovaném obalu. [20]

Tab 2 Parametry ventilátoru

Technické parametry	
Kapacita	2300 - 9100 m ³ _N /h
Celkový tlak	3070 - 1150 Pa
Výkon motoru	7,5 kW
Otáčky	2930 ot/min
Provozní teplota	-30 až +40°C
Lopatky rotoru	dozadu zahnuté

4.1.8 Stanovení referenční hodnoty koncentrace

Referenční hodnota koncentrace v prašné trati je stanovena z množství dávkovaného prachu, doby činnosti vibračního podavače a naměřeného referenčního průtoku vzduchu.

Do vibračního podavače je nasypán předem zvážený prach. Stopkami se měří doba aplikace prachu. Po skončení zkoušky je zváženo zbylé množství prachu ve vibračním podavači. Nadávkované množství prachu je stanoveno rozdílem hmotností před a po aplikaci. Z takto změřených hodnot lze stanovit průměrnou koncentraci a hmotový tok TZL v trati. Jedná se tedy o sledované hodnoty:

- Hmotnost nadávkovaného prachu za odběr m (g)
- Doba dávkování τ (s)
- Průměrná rychlost vzduchu v profilu v efektivních podmínkách w (m/s)
- Atmosférický tlak p_{atm} (Pa)
- Podtlak v testovací trati p_{stat} (Pa)
- Teplota vzduchu v testovací trati t (°C)
- Plocha průřezu profilu $S = 0,0770$ (m²)

Výpočet efektivního průtoku vzduchu v testovací trati Q [m³/s]

$$Q = w \cdot S$$

Výpočet průtoku vzduchu v testovací trati v normálním stavu Q_N [m³_N/s]

$$Q_N = Q \cdot \frac{p_{atm} + p_{stat}}{101325} \cdot \frac{273,15}{t + 273,15}$$

Výpočet hmotnostního toku nadávkovaného do prašné tratě m_{tok} [g/s]

$$m_{tok} = \frac{m}{\tau}$$

Referenční hodnota koncentrace TZL c_{ref} [g/m³_N]

$$c_{ref} = \frac{m_{tok}}{Q_N}$$

4.2 Výpočet ejektoru

Byl vytvořen návrh ejektoru pro dopravu prachu do měřicího úseku prašné tratě. Tento návrh obsahuje výpočet a výkresovou dokumentaci viz příloha. Požadované parametry pro návrh ejektoru jsou:

- Nasávané médium je vzduch 20 m³/h a prach v koncentraci 25-2500 g/h.
- Pracovní médium stlačený vzduch o přetlaku 0,6 MPa a teplotě 20°C.
- Výstupní prostředí za kompresorem je dáno tlakem 0,1 MPa.



Obr 21 Návrh ejektoru

4.2.1 Výpočet vstupních parametrů ejektoru

Pro zjednodušení výpočtu se uvažuje se suchým vzduchem. Pro výpočet jednotlivých entalpií, hustot a tlaků je použit program EES-Engineering Equation Solver.

Nasávané médium

$$T_0 = 293,15 \text{ K}$$

$$P_0 = P_{\text{atm}} = 98700 \text{ Pa}$$

$$\rho_0 = 1,173 \text{ kg/m}^3$$

$$w_0 = 20 \text{ m/s}$$

Výpočet nasávaného média m_0 [kg/s]

$$m_0 = (Q_0 \cdot \rho_0) / 3600$$

$$m_0 = (20 \cdot 1,173) / 3600$$

$$m_0 = 0,00652$$

kde: Q_0 je nasávané množství
vzduchu m³/h

Pracovní médium

$$T_1 = 293,15 \text{ K}$$

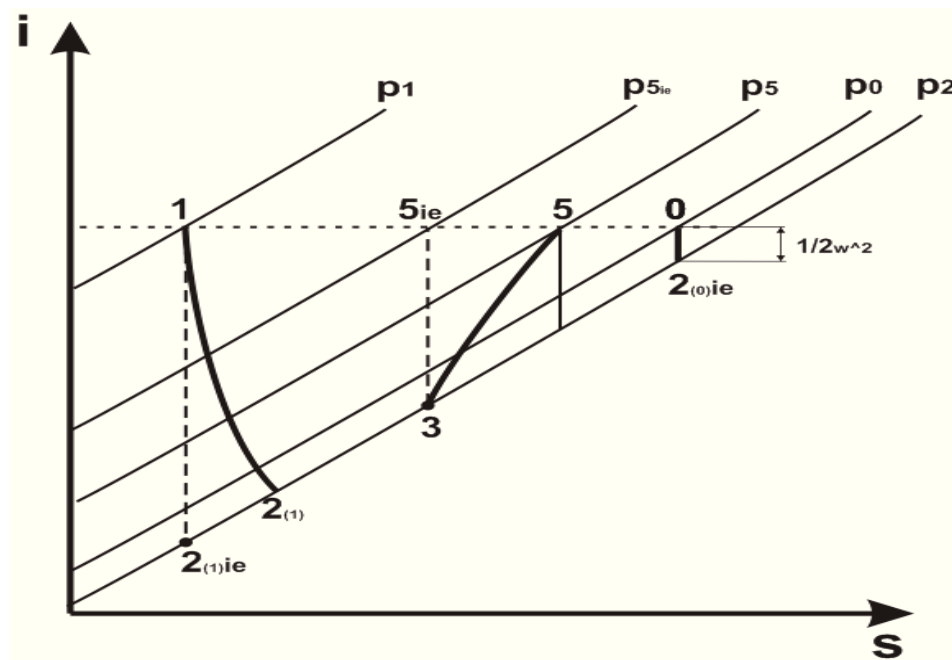
$$P_1 = P_{\text{atm}} + P_{\text{přt}}$$

$$P_1 = 98700 + 600000 = 698700 \text{ Pa}$$

$$\rho_1 = 8,323 \text{ kg/m}^3$$

4.2.2 Výpočet entalpií

Jedná se o proudový kompresor, kdy pracovní a nasávaná látka jsou média stejná a liší se pouze svým statickým tlakem. Pro výpočet tohoto kompresoru je charakteristické rovnost entalpií $i_1 = i_0 = i_5$.



Obr 22 i – s diagram proudového kompresoru

[6]

Výpočet výstupního tlaku P_5 [Pa]

$$P_5 = P_{\text{atm}} + P_{\text{přt}}$$

$$P_5 = 98700 + 100000 = 198700$$

Výpočet entalpií [J/kg]

$$i_1 = i_5 = i_0 = 292500$$

$$i_{2,ie}^{(1)} = 165900$$

$$i_3 = 238000$$

$$i_{2,ie}^{(0)} = i_0 - \frac{1}{2} \cdot w_0^2$$

$$i_{2,ie}^{(0)} = 292500 - \frac{1}{2} \cdot 20^2$$

$$i_{2,ie}^{(0)} = 292300$$

Výpočet tlaku P_2 [Pa] dle EES

$$P_2 = 97400$$

Výpočet hmotnostního toku pracovní látky $m_{1,ie}$ [kg/s]

$$m_{1,ie} \cdot [i_1 - i_{2,ie}^{(1)}] + m_0 [i_0 - i_{2,ie}^{(0)}] = (m_1 + m_0) \cdot (i_5 - i_{3,ie})$$

$$m_{1,ie} = m_0 \cdot \frac{[i_5 - i_3] - [i_0 - i_2^{(0)}]}{[i_1 - i_2^{(1)}] - [i_5 - i_3]}$$

$$m_{1,ie} = m_0 \cdot \frac{[292,5 - 238] - [292,5 - 292,3]}{[292,5 - 165,9] - [292,5 - 238]}$$

$$m_{1,ie} = 0,00491$$

4.2.3 Výpočet dýzy

Výpočet kritické teploty T_{krit} [K]

$$T_{krit} = T_1 \cdot \frac{2}{\chi + 1}$$

$$T_{krit} = 293,15 \cdot \frac{2}{1,4 + 1}$$

$$T_{krit} = 244,3$$

kde:

χ adiabatický exponent
pro vzduch $\chi = 1,4$

Výpočet kritické rychlosti w_{krit} [m/s]

$$w_{\text{krit}} = \sqrt{\chi \cdot r \cdot T_{\text{krit}}}$$

$$w_{\text{krit}} = \sqrt{1,4 \cdot 286,9 \cdot 244,3}$$

$$w_{\text{krit}} = 313,2$$

kde:

r měrná plyn. konstanta
[J/kg*K] $r = 286,9$

Výpočet kritického tlaku P_{krit} [Pa]

$$P_{\text{krit}} = P_1 \cdot \frac{2}{\chi + 1} \cdot \frac{\chi}{\chi - 1}$$

$$P_{\text{krit}} = 698700 \cdot \frac{2}{1,4 + 1} \cdot \frac{1,4}{1,4 - 1}$$

$$P_{\text{krit}} = 369110,5$$

Průměr dýzy d_1 [m] volím

$$d_1 = 0,011\text{m} = 11\text{mm}$$

Rychlost na vstupu do dýzy w_1 [m/s]

$$w_1 = \frac{\frac{m_1}{\rho_1}}{\frac{\pi \cdot d_1^2}{4}} = \frac{\frac{m_1}{\rho_1}}{\frac{\pi \cdot d_1^2}{4}} = \frac{\frac{0,0049}{8,323}}{\frac{\pi \cdot 0,011^2}{4}}$$

$$w_1 = 6,2$$

Výpočet w_{2ie} [m/s]

$$i_1 + \frac{w_1^2}{2} = i_{2,ie} + \frac{w_2^2}{2}$$

$$w_{2,ie} = \sqrt{(i_1 - i_{2,ie}) \cdot 2 + w_1^2}$$

$$w_{2,ie} = \sqrt{(292500 - 165900) \cdot 2 + 6,2^2}$$

$$w_{2,ie} = 503,2$$

$$w_{2,ie} > w_{krit} \gg \text{Nadkritická dýza}$$

Chceme-li ve výtokovém průřezu dosáhnout tlaku prostředí, který je nižší než tlak kritický a využít tak celého rozdílu entalpií k dosažení maximální rychlosti musíme použít nadkritickou Lavalovu dýzu.

Kritický průměr Lavalovy dýzy d_{krit} [m]

$$m_{1,ie} = S_{krit} \cdot w_{krit,ie} \cdot \rho_{krit,ie}$$

$$m_{1,ie} = \frac{\pi \cdot d_{krit}^2}{4} \cdot w_{krit,ie} \cdot \rho_{krit,ie}$$

$$d_{krit} = \sqrt{\frac{m_{1,ie} \cdot 4}{\pi \cdot w_{krit,ie} \cdot \rho_{krit,ie}}}$$

$$d_{krit} = \sqrt{\frac{0,00491 \cdot 4}{\pi \cdot 313,2 \cdot 5,285}}$$

$$d_{krit} = 0,001949 = 1,95 \text{ [mm]}$$

kde:

$\rho_{krit,ie}$ vypočteno v programu EES

Délka zkosení dýzy L_1 [m]

$$L_1 = \frac{d_1 - d_{krit}}{2 \cdot \tan \frac{1}{2} \beta}$$

$$L_1 = \frac{0,011 - 0,00194}{2 \cdot \tan \frac{1}{2} 8}$$

$$L_1 = 0,0647 = 64,7 \text{ mm}$$

kde:

β úhel zkosení (6°-8°) volím 8°

Výpočet výstupní rychlosti $w_{2,ie}^{(1)}$ [m/s]

$$w_{2,ie}^{(1)} = w_1^2 + \sqrt{2 \cdot [i_1 - i_{2,ie}^{(1)}]}$$

$$w_{2,ie}^{(1)} = 6,2^2 + \sqrt{2 \cdot [292500 - 165900]}$$

$$w_{2,ie}^{(1)} = 541,7$$

Průměr dýzy na výstupu d_2 [m]

$$m_{1,ie} = S_2 \cdot w_{2,ie} \cdot \rho_{2,ie}$$

$$m_{1,ie} = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot w_{2,ie} \cdot \rho_{2,ie}$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{m_{1,ie} \cdot 4}{\pi \cdot w_{2,ie} \cdot \rho_{2,ie}}}$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{0,00491 \cdot 4}{\pi \cdot 541,7 \cdot 2,048}}$$

$$d_2 = 0,00238 = 2,4 \text{ [mm]}$$

kde:

$\rho_{2,ie}$ hustota získaná z EES pomocí P_2 a $i_{2,ie}$ [kg/m³]

Délka rozšíření dýzy L_2 [m]

$$L_2 = \frac{d_2 - d_{krit}}{2 \cdot \tan \frac{1}{2} \alpha}$$

$$L_2 = \frac{0,00237 - 0,00194}{2 \cdot \tan \frac{1}{2} 12}$$

$$L_2 = 0,00208 = 2,1 \text{ mm}$$

kde:

α vrcholový úhel (6°-12°) volím 12°

4.2.4 Výpočet směšovací komory

Rychlost smíšených proudů $w_{3,ie}$ [m/s]

$$w_{3,ie} = \frac{m_{1,ie} \cdot w_{2,ie}^{(1)} + m_0 \cdot w_{2,ie}^{(0)}}{m_0 + m_{1,ie}}$$

$$w_{3,ie} = \frac{0,00491 \cdot 541,7 + 0,00652 \cdot 20}{0,00652 + 0,00491}$$

$$w_{3,ie} = 244,1$$

Průměr směšovací komory d_3 [m]

$$m_0 + m_{1,ie} = S_3 \cdot w_{3,ie} \cdot \rho_{3,ie}$$

$$m_0 + m_{1,ie} = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} w_{3,ie} \cdot \rho_{3,ie}$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot (m_0 + m_{1,ie})}{w_{3,ie} \cdot \rho_{3,ie} \cdot \pi}}$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot (0,00652 + 0,00491)}{244,1 \cdot 1,427 \cdot \pi}}$$

$$d_3 = 0,00646 = 6,5\text{mm}$$

kde:

$\rho_{3,ie}$ hustota získaná z EES pomocí P_2 a $i_{3,ie}$ [kg/m³]

Délka směšovací komory L_3 [m]

$$L_3 = 8 \cdot d_3$$

$$L_3 = 8 \cdot 0,00646$$

$$L_3 = 0,05169 = 52\text{mm}$$

Velikost přesahu L_t [m]

$$L_t = 0,77 \cdot d_3$$

$$L_t = 0,77 \cdot 0,00646$$

$$L_t = 0,004975 = 5\text{mm}$$

4.2.5 Výpočet difuzoru

Výpočet výstupní rychlosti $w_{5,ie}$ [m/s], jedná se o pneumatickou dopravu a tedy rychlost proudící vzdušiny by neměl být menší jak 16 m/s z důvodu usazování částic v potrubí.

$$w_{5,ie} = 20 \text{ volím}$$

Průměr difuzoru d_3 [m]

$$m_0 + m_{1,ie} = S_5 \cdot w_{5,ie} \cdot \rho_{5,ie}$$

$$d_5 = \sqrt{\frac{4 \cdot (m_0 + m_{1,ie})}{w_{5,ie} \cdot \rho_{5,ie} \cdot \pi}}$$

$$d_5 = \sqrt{\frac{4 \cdot (m_0 + m_{1,ie})}{w_{5,ie} \cdot \rho_{5,ie} \cdot \pi}}$$

$$d_5 = \sqrt{\frac{4 \cdot (0,00652 + 0,00491)}{20 \cdot 2,368 \cdot \pi}}$$

$$d_5 = 0,01752 = 17,5\text{mm}$$

kde:

$\rho_{5,ie}$ hustota získaná z EES
pomocí P_5 a i_{5ie} [kg/m³]

Výpočet délky difuzoru L_D [m]

$$L_D = \frac{d_5 - d_3}{2 \cdot \tan \frac{1}{2} \gamma}$$

$$L_D = \frac{0,01752 - 0,00646}{2 \cdot \tan \frac{1}{2} 8}$$

$$L_D = 0,00791 = 7,9\text{mm}$$

kde:

γ vrcholový úhel (6° - 10°)
volím 8°

[6]

5 Ne-izokinetický odběr vzorku

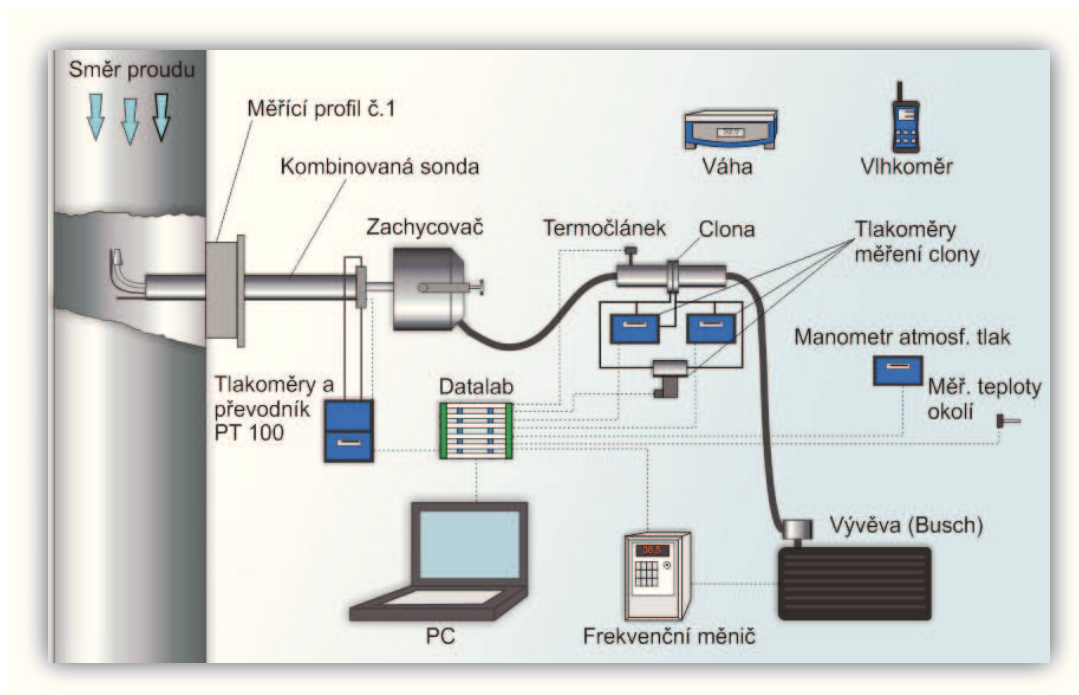
Cílem tohoto bodu je ověření vlivu ne-izokinetického odsávání vzorku na výslednou koncentraci a hmotnostní tok TZL. Kde se vychází z předpokladu, že při přesátí vzorku, tj. při hyperkinetickém odběru obsahuje vzorek méně částic a naopak při podsátí vzorku tj. hypokinetickém odběru, je ve vzorku obsaženo více částic.

Pro experimentální měření vlivu ne-izokinetického odběru je využita prašná trať.

5.1 Odběrová aparatura

Měření je prováděno gravimetrickou aparaturou viz Obr 23 dle postupu ČSN 9096. Pro výpočet okamžitého množství odsátého vzorku, tak aby byli splněny podmínky zvoleného izokinetického poměru, je nutné měřit rychlost a stavové podmínky (tlak, teplota) v daném měřicím bodě.

Toto je zajištěno kombinovanou odběrovou sondou, která se skládá s odběrové hubice, rychlostní Prandtlovy sondy typu L a termočlánu, kde k vyhodnocení snímaných veličin dochází v převodníku pro snímání teploty a tlaků. Sonda je dále napojena na externí vyhřívaný zachycovač, kde se na filtru o průměru 150 mm ze skleněných mikrovláken zn. MUNKTELL zachytí veškerý prach z odsávaného vzorku vzduchu. Odběrová aparatura neobsahuje kondenzátor, protože nosné médium je vzduch a během vzorkování nedochází k podkročení rosného bodu. Vzorek je dále veden přes průtokoměr (clonu), který slouží pro stanovení odebraného objemu vzduchu při efektivních podmínkách. Clona je vybavena dvěma diferenčními a jedním absolutním snímačem tlaku od firmy Cressto. Za průtokoměrem je řazena vývěva firmy Busch s maximálním výkonem 25m³/h, která je regulována frekvenčním měničem. Odběrová aparatura je propojena přes datový převodník datalab do počítače, kde dochází k vyhodnocování naměřených dat. Pro stanovení vlhkosti vzduchu slouží vlhkoměr od firmy Comet.



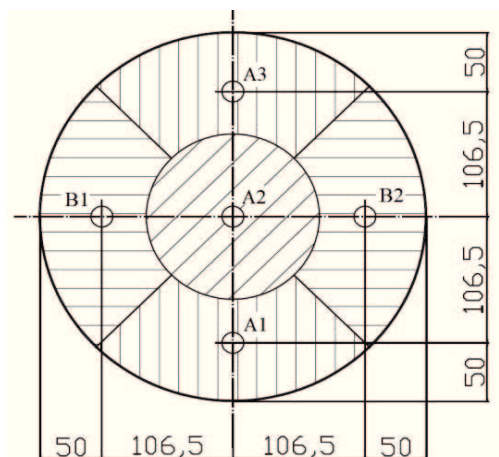
Obr 23 Schéma odběrové aparatury

5.1.1 Parametry odběrové aparatury

Sada odběrových hubic – průměr hrdla:	6 až 30 mm
Kombinovaná odběrová sonda délka:	1000 mm
Zachycovač s průměrem filtru:	150 mm
Měřicí systém - termočlánek kouřovod:	0 - 400°C
Snímač tlakové difference:	0-300 Pa
Snímač statického tlaku:	±3000 Pa
Zdroj sání max. 25m ³ /h při 50Hz:	rozměry - 540x280x240 mm hmotnost – 31 kg
Průtokoměr (clona) - termočlánek:	0 – 150°C
Snímač diferenčního tlaku:	0 – 7000 Pa
Snímač absolutního tlaku:	0 – 120 kPa
Snímač diferenčního tlaku:	0 – 10 000 Pa
Měření okolního prostředí – termočlánek:	-5 až +40°C
Snímač atmosférického tlaku:	80 – 120 kPa

5.2 Výpočet

Princip měření je založen na odsátí vzorku plynu z potrubí s určitým izokinetickým poměrem (0,5; 0,75; 0,95; 1; 1,15; 1,25; 1,5). Měřeným médiem je vlhký vzduch s nadávkovaným prachem vz. 610/10 viz příloha, který proudí potrubím odběrového úseku prašné tratě o průměru 313 ±2 mm. Měřicí profil je rozdělen do 5 odběrových bodů a na dvě odběrové přímky (A,B) dle základního rozdělení viz Obr 24. Měření v jednom bodě trvá 10 min. Celková doba odběru tedy odpovídá délce 50 min z důvodu dostatečného množství odsátého vzorku a zachycených TZL na filtru.



Obr 24 Schéma rozmístění odběrových bodů v měřícím profilu

Následující výpočty jsou znázorněny na měření ze dne **2011_04_15**, kde se jedná o odběr č. 1. Naměřené hodnoty ze zkoušky jsou zapsány v Tab 3.

Tab 3 Měřené hodnoty sledovaného média

Teplota odpadního plynu [°C]	23
Statický tlak odp. plynu [Pa]	-160
Atmosférický tlak [Pa]	98580
Relativní vlhkost [%]	50
Izokinetický poměr [-]	1

5.2.1 Výpočet hustoty

Prvním parametrem pro určení rychlosti měřeného média je výpočet jeho hustoty. Při výpočtu se vychází ze základního chemického složení vlhkého vzduchu a jeho objemové zastoupení v atmosféře za normálních podmínek ($N_2; O_2; Ar; H_2O$) viz Tab 4. Dále se vychází z toho, že všechny plynné látky o látkovém množství 1 kmol mají za normálních podmínek objem $22,4 \text{ m}^3$. Hustotu vlhkého vzduchu stanovíme pomocí příslušných hustot jeho složek za normálních podmínek.

Tab 4 Průměrné složení atmosférického vzduchu

Složka vzduchu		Suchý vzduch	Vlhký vzduch	Mol. hmotnost M_{kmol}
		% obj	% obj	kg/kmol
Dusík	N ₂	78,08	75,65	28
Kyslík	O ₂	20,95	20,29	32
Argon	Ar	0,93	0,9	40
Vodní pára	H ₂ O	-	3,12	18
Suma		99,96	99,96	-

Hustota vzduchu za normálních podmínek $\rho_{N,i}$ [kg/m³_N]

$$\rho_{N,i} = \frac{M_{\text{kmol},i}}{V_{\text{kmol},N,i}}$$

$$\rho_{N,N_2} = \frac{28}{22,4} = 1,250$$

$$\rho_{N,O_2} = \frac{32}{22,4} = 1,429$$

$$\rho_{N,Ar} = \frac{40}{22,4} = 1,786$$

$$\rho_{N,H_2O} = \frac{18}{22,4} = 0,804$$

$$\rho_N = \rho_{s,N} \cdot \frac{p - p_p}{p} + \rho_{N,H_2O} \cdot \frac{p_p}{p}$$

$$\rho_N = 1,292 \cdot \frac{98420 - 1405,3}{98420} + 0,804 \cdot \frac{1405,3}{98420}$$

$$\rho_N = 1,285 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

kde:

$\rho_{s,N}$ hustota suchého vzduchu při normálních podmínkách [kg/m_N³]

p efektivní tlak vzduchu při dané teplotě [Pa]

p_p parciální tlak vodní páry vzduchu při dané teplotě [Pa]

$$\rho_{s,N} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \rho_{N,i}$$

$$\rho_{s,N} = 0,7808 \cdot 1,25 + 0,2095 \cdot 1,429 + 0,0093 \cdot 1,786 = 1,292 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

kde:

x_i objemový podíl í-té složky v suchém plynu [-]

$\rho_{N,i}$ hustota í-té složky při normálních podmínkách [kg/m³]

Hustota vlhkého plynu ρ [kg/m³_N]

$$\rho = \rho_N \cdot \frac{p}{p_N} \cdot \frac{T_N}{T}$$

$$\rho = 1,285 \cdot \frac{98420}{101325} \cdot \frac{273,15}{296,15}$$

$$\rho = 1,151 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

kde:

p_N tlak za normálních podmínek [Pa]

T_N teplota za normálních podmínek [K]

T efektivní teplota [K]

Relativní vlhkost φ [-]

Z výše uvedených vztahů vyplývá neznámá hodnota parciální tlak vodní páry p_p . Tuto hodnotu můžeme vyjádřit z naměřených hodnot relativní vlhkosti:

$$\varphi = \frac{p_p}{p''_p}$$

$$0,5 = \frac{p_p}{2810,7}$$

$$p_p = 1405,3 \text{ [Pa]}$$

kde:

p_p parciální tlak syté vodní páry při dané teplotě [Pa] je závislý pouze na teplotě a pro výpočet lze použít vztah pro teploty vzduchu -20 až 0°C s chybou menší než 1‰:

$$\ln p''_p = 28,926 - \frac{6148}{273,15 + t}$$

a pro teploty vzduchu 0 až 80 °C s chybou menší než 1‰:

$$\ln p''_p = 23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + t}$$

$$\ln p''_p = 23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + 23}$$

$$p''_p = 2810,7 \text{ [Pa]}$$

kde:

t efektivní teplota vzduchu [°C]

[16]

5.2.2 Výpočet proudění vzdušiny v měřícím profilu

Měření průtoku vzdušiny je prováděno pomocí Prandtlovy sondy typu L s konstantou $K = 0,9909$, kde naměřené zprůměrované hodnoty diferenčních tlaků jsou zapsány v Tab 5.

Tab 5 Měřené hodnoty diferenčního tlaku v odběrových bodech

Měř. bod	1	2	3
A	96,86	120,19	105,95
B	93,57	84,4	-

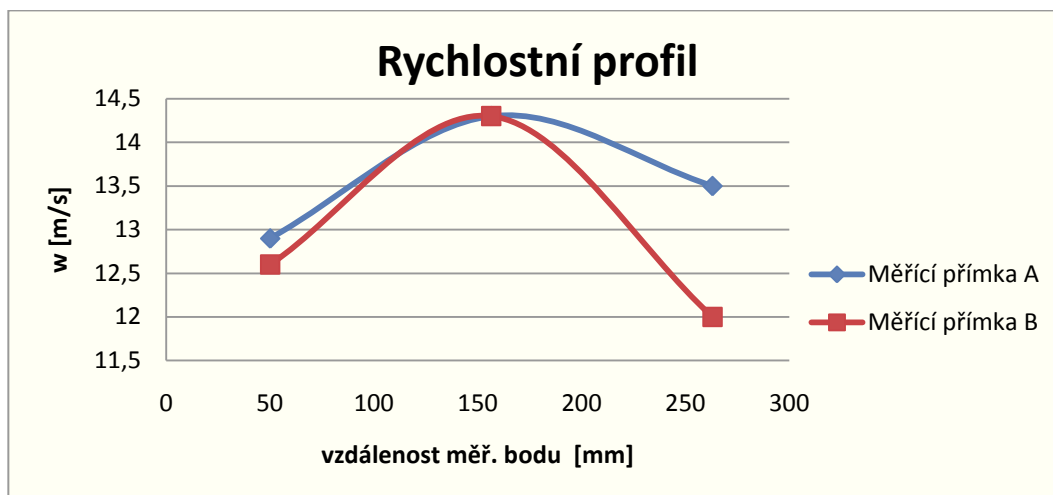
Výpočet rychlosti w [m/s] v jednotlivých bodech

Výsledky výpočtu viz Tab 6 a Graf 1.

$$w = K \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = 0,9909 \sqrt{\frac{2 \cdot 96,86}{1,151}} = 12,9$$

Tab 6 Výpočet rychlosti v odběrových bodech

Měř. bod	1	2	3
A	12,9	14,3	13,5
B	12,6	12,0	-



Graf 1 Rychlostní profil

Výpočet objemového toku vzdušiny V_i [m³/s]

Objemový tok vzdušiny se určí ze vztahu:

$$V_i = S_i \cdot w_i$$

kde:

S_i jednotlivá dílčí rovnoplocha mezikruží [m²]

Příklad výpočtu pro měřící přímku A, kde výsledky jsou zapsány viz Tab 7.

$$V_1^A = S_1^A \cdot w_1^A = 0,0154 \cdot 12,9 = 0,1985$$

$$V_2^A = S_2^A \cdot w_2^A = 0,0154 \cdot 14,3 = 0,2201$$

$$V_3^A = S_3^A \cdot w_3^A = 0,0154 \cdot 13,5 = 0,2077$$

Tab 7 objemové toky vzdušiny ve všech měřících bodech

Měř. Bod	1	2	3
A	0,1985	0,2201	0,2077
B	0,1939	0,1847	-

Celkový objemový tok proudící vzdušiny se určí ze vztahu:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i^A + \sum_{i=1}^n V_i^B = 1,0049$$

Celkový objemový tok proudící vzdušiny za normálních podmínek vlhký:

$$V_N = V \cdot \frac{p}{p_N} \cdot \frac{T_N}{T}$$

$$V_N = 1,0049 \cdot \frac{98420}{101325} \cdot \frac{273,15}{296,15}$$

$$V_N = 0,9003$$

$$V_N = 0,9003 \cdot 3600 = 3241,0 [\text{m}_N^3/\text{h}]$$

[16]

5.2.3 Stanovení koncentrace a hmotnostního toku TZL

Stanovení hmotnostní koncentrace tuhých částic C_{TL} [mg/m^3]

Při vyjádření hmotnostní koncentrace tuhých částic pro případ jediného vzorku vzorkovaného v celém měřicím profilu se vychází ze vztahu:

$$C_{TL} = \frac{\Delta m}{V_{vz}}$$

kde:

Δm hmotnost tuhých částic zachycená na filtru [mg]

V_{vz} objem odebraného vzorku [m^3] přepočtené na požadované podmínky (suchý, normální, vlhký)

Příklad naměřených hodnot během zkoušky ze dne **2011_04_15**, odběr č. 1 viz Tab 8.

Tab 8 Měřené hodnoty pro výpočet hmot. koncentrace C_{TL}

Výsledky měření:		2011_04_15	
Označení odběru	Hmotnost filtru zač. m_1 [mg]	Hmotnost filtru kon. m_2 [mg]	Odebrané množství vzorku vlhkého plynu V_{vz}^V [m_N^3]
1.	1095,6	1409,5	8,815

$$C_{TL} = \frac{\Delta m}{V_{vz}^V} = \frac{m_2 - m_1}{V_{vz}^V} = \frac{1409,5 - 1095,6}{8,815}$$

$$C_{TL} = 35,61$$

Hmotnostní tok tuhých částic q_{TL} [g/h]

Hmotnostní tok částic se vypočítá jako součin hmotnostní koncentrace tuhých částic a průtoku vzdušiny potrubím:

$$q_{TL} = C_{TL} \cdot V$$

kde:

V průtok plynu v potrubí [m^3] za určitých daných podmínek (suchý, normální, vlhký)

$$q_{TL} = C_{TL} \cdot V_N = 35,61 \cdot 3241,0$$

$$q_{TL} = 115412,7/1000 = 115,4$$

[16]

5.2.4 Určení přesnosti měření

Při určení přesnosti naměřených hodnot lze vycházet ze skutečnosti, že známe pravou hodnotu tj. nastavenou referenční hodnotu hmotnostní koncentrace a hmotnostního toku prachu v prašné trati. Chybu jednotlivých měření lze tedy stanovit srovnáním s pravou nastavenou hodnotou v prašné trati. Chybu měření můžeme vyjádřit jako:

Chyba měření absolutní ε [-]

Je rozdíl mezi naměřenou hodnotou a pravou (konvenčně pravou) hodnotou udává se v jednotkách měřené veličiny:

$$\varepsilon = y - x_o$$

kde:

y naměřená hodnota

x_o pravá hodnota

Chyba měření relativní δ [%]

Je poměr absolutní chyby měření a pravé hodnoty měřené veličiny

$$\delta = \frac{\varepsilon}{x_o} \cdot 100$$

Jako příklad jsou uvedeny hodnoty ze zkoušky dne **2011_04_15**, kde jsou výsledky naměřené na prašné trati uvedeny viz Tab 9 a stanovení chyb měření viz Tab 10. Stanovení referenční hodnoty koncentrace na prašné trati dle kapitoly 4.1.8.

Tab 9 Hodnoty na prašné trati

Prašná trať			
Kód odběru [rr_mm_dd_oo]		2011_04_15_01	
Teplota vzdušiny [°C]	23,7	Množství nadáv. prachu m [g]	118,4
Statický tlak [Pa]	-171,2	Doba dávkování τ [min]	55
Atmosférický tlak [Pa]	98,617	Hmotnostní tok m_{tok} [g/h]	129,2
Rychlost proudu vzdušiny v [m/s]	12,12	Koncentrace TZL C_{ref} [mg/m ³ _N]	43,1
Průtok vzdušiny Q_N [m ³ _N /h]	3000		

Tab 10 Stanovení chyby měření

Hmotnostní koncentrace C [mg/m ³ _N]			Chyba měření	
Odběr	Tuhařská aparatura C_{TL}	Prašná trať C_{ref}	Absolutní ε [mg/m ³]	Relativní δ [%]
č. 1	35,61	43,1	-7,49	-17,4
Hmotnostní tok [g/h]			Chyba měření	
Odběr	Tuhařská aparatura q_{TL}	Prašná trať m_{tok}	Absolutní ε [g/h]	Relativní δ [%]
č. 1	115,4	129,2	-13,6	-10,5

[9]

5.3 Výsledky měření

Dne 14.4.2011 až 28.4.2011 bylo celkem provedeno 24 měření při určitém izokinetickém poměru pro stanovení vlivu na výslednou koncentraci a hmotnostní tok TZL. Měření byla provedena v měřicím profilu č. 1, tj. v horní části odběrového úseku prašné trati. Výsledky měření jsou podrobně vyhodnoceny viz **Příloha 2** až **Příloha 8**.

Po celou dobu měření byla udržována dle možností v prašné trati konstantní distribuce prachu. Pro kontrolu byl z výstupního signálu triboelektrického kontinuálního prachoměru a z výstupního signálu nainstalovaného optického prachoměru SICK FW100

v měřícím profilu č. 2, tj. spodní části odběrového úseku prašné tratě vytvořen graf distribuce prachu. V případě, že dojde při měření k nerovnoměrnosti dávkování, je toto měření vyloučeno z důvodu zatížení hrubou chybou. K tomuto došlo při měření 2011_04_14 odběr č. 3. Taktéž měření 2011_04_27, odběr č. 1, je z naměřených hodnot vyloučeno z důvodu zatížení hrubou chybou, kde došlo k nesprávnému nastavení času odběru a tím většímu přesátí vzorku.

Pro měření 2011_04_27 a 2011_04_28 byl proveden oplach sondy. Provedení spočívalo ve vyčištění sondy před měřením 2x destilovanou vodou a následně 2x acetonem. Následně proběhly všechny 3 odběry, po dokončení se opět sonda vyčistila 2x destilovanou vodou a 2x acetonem. Vzniklý oplach byl dále zpracován. Výsledek oplachu byl zanedbatelný cca 1% z celkového zachyceného množství prachu. Výsledky jsou uvedeny v příloze u daných měření.

5.3.1 Vliv ne-izokinetického odběru na stanovení hmot. koncentrace TZL

V Tab 11 je stručné vyhodnocení měření vyjádřené na hmotnostní koncentraci TZL. Dále je měření vyjádřené graficky viz Graf 2. Ve vyhodnocení viz Graf 3 je použita korekce k. Výsledné hodnoty v grafu jsou proloženy polynomickou spojnici trendu.

Korekce k [%]

$$k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i$$

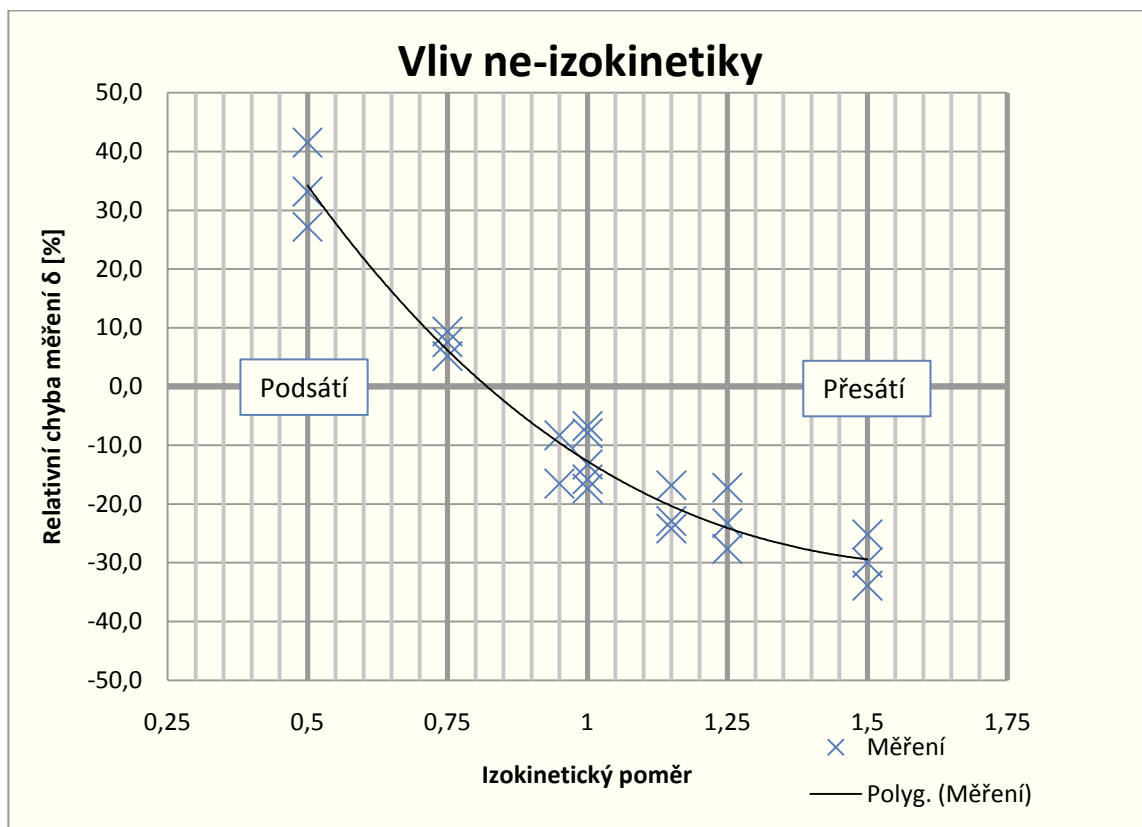
kde:

δ_i jednotlivé naměřené hodnoty relativní chyby při izokinetickém odběru

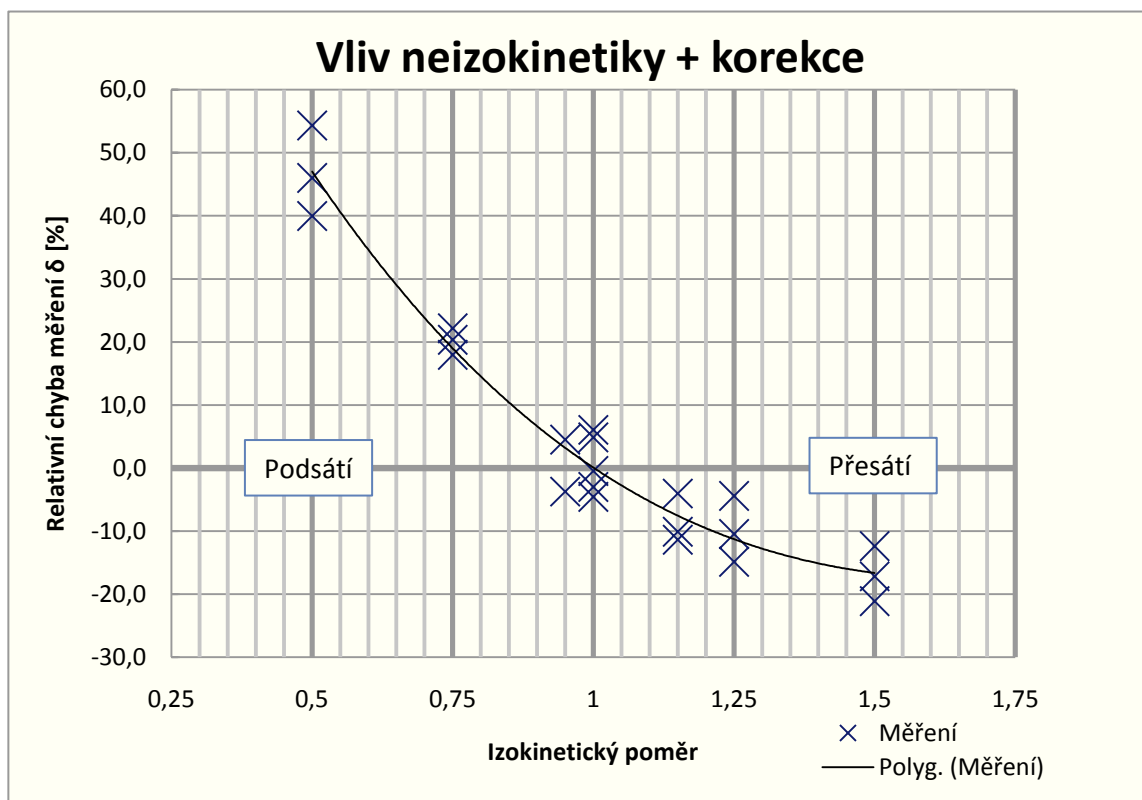
n počet izokinetických odběrů

Tab 11 Vyhodnocení hmotnostní koncentrace TZL

Datum měření	Označení odběru	Izokinetický poměr	Hmotnostní koncentrace C_{TL}	Hmotnostní koncentrace C_{ref}	Abs. chyba ε	Rel. chyba δ	Rel. chyba δ + korekce k
rr_mm_dd	-	-	[mg/m ³ _N]	[mg/m ³ _N]	[mg/m ³ _N]	%	%
2011_04_14	1.	1	22,46	24,4	-1,94	-7,9	4,9
	2.	1	24,37	28,1	-3,73	-13,3	-0,5
2011_04_15	1.	1	35,61	43,1	-7,49	-17,4	-4,6
	2.	1	51,67	55,4	-3,73	-6,7	6,1
	3.	1	47,15	56	-8,85	-15,8	-3,0
2011_04_19	1.	0,5	76,86	54,3	22,56	41,5	54,3
	2.	0,5	70,46	52,9	17,56	33,2	46,0
	3.	0,5	71,98	56,6	15,38	27,2	40,0
2011_04_20	1.	0,75	54,69	52	2,69	5,2	18,0
	2.	0,75	61,83	57,5	4,33	7,5	20,3
	3.	0,75	60,69	55,5	5,19	9,4	22,2
2011_04_21	1.	1,25	40,83	53,2	-12,37	-23,2	-10,4
	2.	1,25	38,05	52,6	-14,55	-27,7	-14,9
	3.	1,25	49,10	59,3	-10,20	-17,2	-4,4
2011_04_22	1.	1,5	45,70	61,1	-15,40	-25,2	-12,4
	2.	1,5	38,46	58,2	-19,74	-33,9	-21,1
	3.	1,5	38,58	55,1	-16,52	-30,0	-17,2
2011_04_27	2.	0,95	44,74	53,6	-8,86	-16,5	-3,7
	3.	0,95	50,16	54,7	-4,54	-8,3	4,5
2011_04_28	1.	1,15	45,57	54,8	-9,23	-16,8	-4,0
	2.	1,15	43,18	56	-12,82	-22,9	-10,1
	3.	1,15	42,91	56,6	-13,69	-24,2	-11,4



Graf 2 Vliv ne-izokinetiky na hmotnostní koncentraci TZL



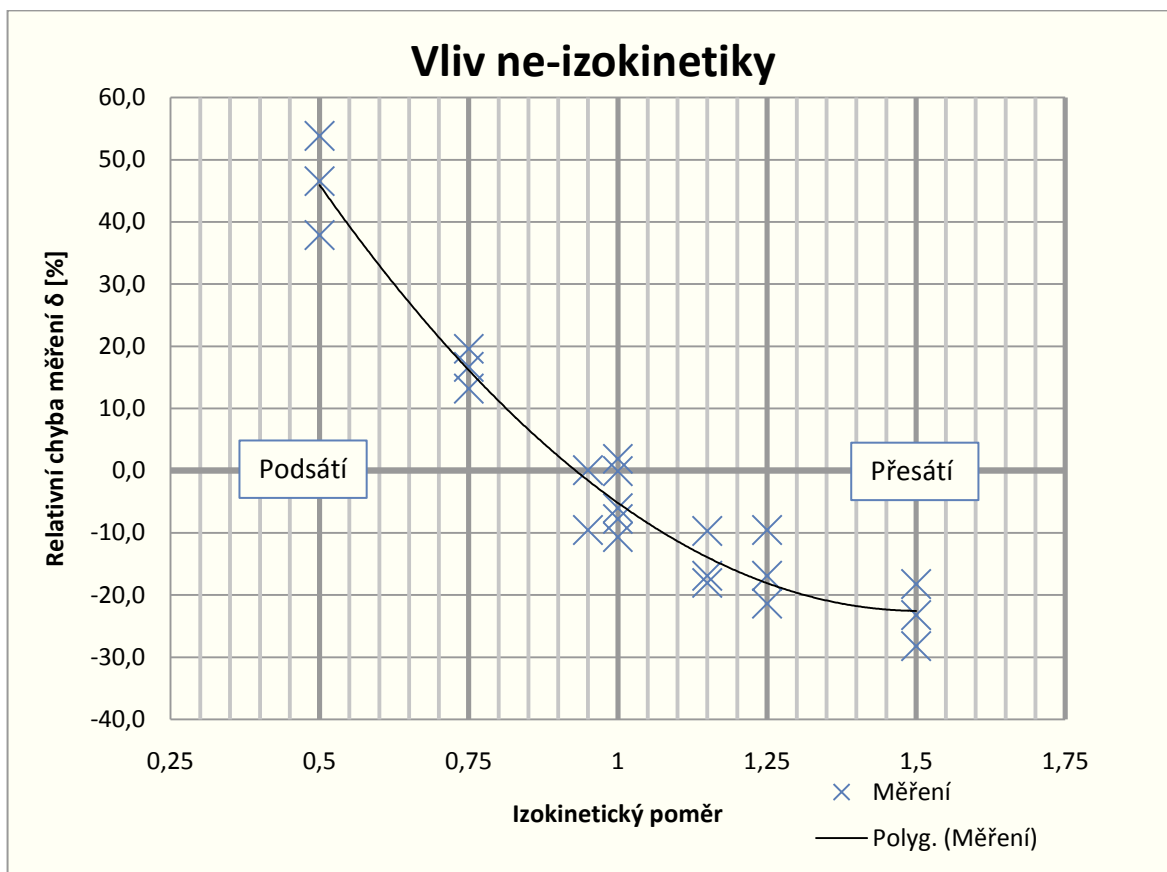
Graf 3 Vliv ne-izokinetiky na hmotnostní koncentraci TZL + korekce

5.3.2 Vliv ne-izokinetického odběru na stanovení hmotnostního toku TZL

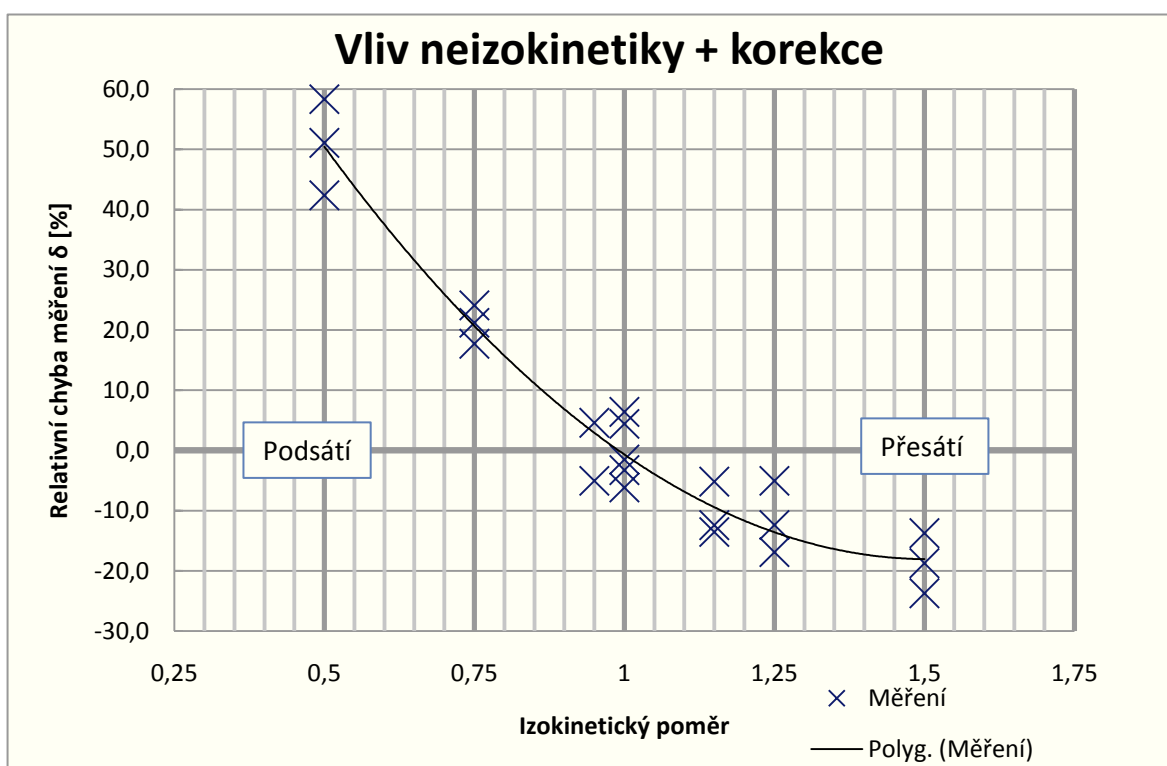
V Tab 12 je vyhodnocení měření vyjádřené na hmotnostní tok TZL. Stejně jako v předchozím bodě je zde uvedeno grafické vyjádření výsledků viz Graf 4 a Graf 5. Hodnota korekce k vychází taktéž z uvedeného vztahu v předchozím bodě.

Tab 12 Vyhodnocení hmotnostního toku TZL

Datum měření	Označení odběru	Izokinetický poměr	Hmotnostní tok q_{TL}	Hmotnostní tok m_{tok}	Abs. chyba ϵ	Rel. chyba δ	Rel. chyba δ + korekce k
rr_mm_dd	-	-	[g/h]	[g/h]	[g/h]	%	%
2011_04_14	1.	1	73,13	73,2	-0,07	-0,1	4,4
	2.	1	79,23	84,3	-5,07	-6,0	-1,5
2011_04_15	1.	1	115,41	129,2	-13,79	-10,7	-6,2
	2.	1	169,27	166,1	3,17	1,9	6,4
	3.	1	155,03	168,1	-13,07	-7,8	-3,3
2011_04_19	1.	0,5	250,91	163,1	87,81	53,8	58,3
	2.	0,5	232,46	158,6	73,86	46,6	51,1
	3.	0,5	234,26	169,9	64,36	37,9	42,4
2011_04_20	1.	0,75	176,60	156	20,60	13,2	17,7
	2.	0,75	201,30	172,5	28,80	16,7	21,2
	3.	0,75	199,26	166,6	32,66	19,6	24,1
2011_04_21	1.	1,25	132,73	159,7	-26,97	-16,9	-12,4
	2.	1,25	124,12	157,9	-33,78	-21,4	-16,9
	3.	1,25	160,92	177,9	-16,98	-9,5	-5,0
2011_04_22	1.	1,5	149,78	183,2	-33,42	-18,2	-13,7
	2.	1,5	125,39	174,7	-49,31	-28,2	-23,7
	3.	1,5	126,92	165,3	-38,38	-23,2	-18,7
2011_04_27	2.	0,95	145,44	160,8	-15,36	-9,6	-5,1
	3.	0,95	164,35	164,2	0,15	0,1	4,6
2011_04_28	1.	1,15	148,57	164,5	-15,93	-9,7	-5,2
	2.	1,15	139,69	168,1	-28,41	-16,9	-12,4
	3.	1,15	139,06	169,7	-30,64	-18,1	-13,6



Graf 4 Vliv ne-izokinetiky na hmotnostní tok TZL



Graf 5 Vliv ne-izokinetiky na hmotnostní tok TZL + korekce

5.3.3 Vyhodnocení měření

- Během měření se podařilo docílit stabilního dávkování prachu do prašné tratě viz grafy distribuce prachu u jednotlivých měření.
- Při měření byla udržována v prašné trati průměrná hmotnostní koncentrace $52 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$ a hmotnostní tok TZL 157 g/h.
- Z naměřených dat vyplývá, že podsátí vzorku má na výslednou chybu hmotnostní koncentrace větší vliv, než je tomu při přesátí. Dá se konstatovat, že vliv podsátí je více jak dvojnásobný na výslednou chybu měření.
- Výsledná křivka ne-izokinetiky byla provedena pouze se vzorkem vz.610/10 o dané granulometrii viz Příloha 1. Nelze tedy konstatovat, jak se bude tato křivka chovat při vzorkování s prachem o větší (menší) granulometrii.
- Při srovnání měřeného průtoku vzdušiny a skutečného průtoku v prašné trati docházelo k systematické chybě. Toto je způsobeno nerovnoměrným rychlostním profilem v odběrovém úseku prašné tratě a ne příliš vhodným rozmístěním vzorkovacích bodů.

6 Závěr

Obecně platí, že technika vzorkování tuhých částic je nejsvízelnějším problémem analýzy ovzduší. Je to dáno charakterem proudění v uzavřeném profilu, charakterem tuhých částic, vlivem gravitace a dalších faktorů spojených s hmotností částic. Tuto techniku ovlivňuje rozhodující měrou i izokinetika odběru vzorku.

V diplomové práci byl zpracován přehled základních metod pro stanovení TZL, který byl především zaměřen na manuální gravimetrické metody stanovení TZL. Dále byly v úvodní části práce popsány obecné vlastnosti a vliv tuhých znečišťujících látek na lidské zdraví a jeho okolí.

V následující části práce bylo popsáno experimentální zařízení, které se nachází na Výzkumném energetickém centru VŠB – Technické univerzity Ostrava. Toto zařízení umožňuje nastavení referenčních hodnot pro následné měření TZL. Díky tomu bylo možné realizovat vlastní experimentální ověření vlivu odchylky od izokinetického odběru vzorku na stanovení koncentrace TZL.

Výsledky dosažené při experimentu potvrdily předpoklady vlivu ne-izokinetického odběru vzorku na jeho výslednou hmotnostní koncentraci a hmotnostní tok TZL.

Seznam použité literatury

- [1] RAJNIAK, I. a kol.: Tepelno-energetické emisné merania. Bratislava: Svornosť, 1997, ISBN 80-88683-20-3
- [2] ČSN EN 13284-1. *Stacionární zdroje emisí - Stanovení nízkých hmotnostních koncentrací prachu - Manuální gravimetrická metoda*. Praha : Český normalizační institut, 2002. 44 s.
- [3] ČSN EN ISO 9096. *Stacionární zdroje emisí – Stanovení hmotnostní koncentrace a hmotnostního toku tuhých částic v potrubí – Manuální gravimetrická metoda*. Praha : Český normalizační institut, 1998. 40 s.
- [4] ČSN EN 14181. *Stacionární zdroje emisí : Prokazování jakosti automatizovaných měřicích systémů*. Praha : Český normalizační institut, 2005. 56 s.
- [5] ČSN EN 5167-4. *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu - Část 4: Venturiho trubice*. Praha : Český normalizační institut, 2003. 28 s.
- [6] KOLARČÍK, Kamil. *Proudové kompresory*. Ostrava : Vysoká škola báňská, 1994. 29 s.: il. s. ISBN 80-7078-212-9(brož.).
- [7] Vejvoda, J.: a kol. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů (skripta)*. Praha.: VŠCHT, 2003, ISBN 80-7080-517X
- [8] Nový, R a kol.: *Technika prostředí (skripta)*. Praha.: ČVUT, 2000, ISBN 80-01-02108-4
- [9] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie: Část I*. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava , 2008. 104 s. ISBN 978-80-248-0671-6.
- [10] HORÁK, Jiří. Testovací trať stanovení TZL. In *Testovací trať stanovení TZL: Konference měření emisí Seč 2008*. Ostrava : VŠB-TOU, Výzkumné energetické centrum, 2008. s. 7. Dostupné z WWW: <http://vec.vsb.cz/cs/doc/TZL_verze4.pdf>.
- [11] HORÁK, Jiří; HOPAN, František; KYSUČAN, Zdeněk. Nová testovací trať stanovení TZL mezilaboratorní porovnání zkoušek 2009. In *Testovací trať stanovení TZL : Konference měření emisí Seč 2009*. Ostrava : VŠB-TOU, Výzkumné energetické centrum, 2009. s. 9. Dostupné z WWW: <http://vec.vsb.cz/cs/doc/TZL_verze5.pdf>.

- [12] Zpráva z testovací trati stanovení TZL. In *Zpráva ze vstupních měření na prašné trati*. Ostrava : VŠB-TOU, Výzkumné energetické centrum, 2009. s. 15. Dostupné z WWW: <http://vec.vsb.cz/cs/doc/TZL08_09.pdf>.
- [13] Zpráva z nultého kola MPZ stanovení TZL a střední rychlosti. In *Zpráva z nultého kola MPZ*. Ostrava : VŠB-TOU, Výzkumné energetické centrum, 2009. s. 16. Dostupné z WWW: <http://vec.vsb.cz/cs/doc/TZL_nulte.pdf>.
- [14] *Polétavý prach* [online]. 2006 [cit. 2011-03-15]. Integrovaný registr znečišťování. Dostupné z WWW: <<http://irz.cz/irz/new/node/179#ovzdusi>>.
- [15] *Měřicí technika pro ekologii : Průtok plynů* [online]. 1990 [cit. 2011-03-18]. Ekotechnika. Dostupné z WWW: <<http://www.prutoky.cz/plyny/prandtlovy-trubice/>>.
- [16] *Ústav techniky prostředí* [online]. 2007 [cit. 2011-03-21]. ČVUT FS. Dostupné z WWW: <http://utp.fs.cvut.cz/download/zoo_texty.pdf>.
- [17] *Levelexpert.cz* [online]. 2007 [cit. 2011-03-22]. LEVEL INSTRUMENTS CZ - LEVEL EXPERT. Dostupné z WWW: <<http://www.levelexpert.cz/produkty-detail.php?kod=40&kategorie=3>>.
- [18] *Odbornecasopisy.cz* [online]. 2005 [cit. 2011-03-22]. Meranie koncentrácie respirabilnej frakcie prachu na princípe rozptylu svetla. Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30487>.
- [19] RAYMAN spol. s r.o. Kladno, *Podklady k filtračnímu zařízení* Filtr FH 16-1214-4x4-1.
- [20] NEDERMAN & CO, *Prospekt k ventilátoru“ Nederman Fan NCF 80/20, 50 Hz*“Dostupný z WWW: <http://www.nederman.com/~media/PDF%20files/Fans/9880035100_NCF%2080%2020%20%2050%20Hz%20pdf.ashx>.

Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obr. 1 Charakteristické rozměry částic	7
Obr. 2 Křivka zrnitosti prachu	7
Obr 3 Vzorkovací potrubí kruhového průřezu	12
Obr 4 Rozmístění vzorkovacích bodů v potrubí kruhového průřezu	13
Obr 5 Příklad sestavy měřicí aparatury	13
Obr 6 Tvar hubice sondy	14
Obr 7 Princip měření Prandtlou trubicí	17
Obr 8 Schéma konstrukce Prandtlou trubice typu L	18
Obr 9 Schéma konstrukce Prandtlou trubice typu S.....	19
Obr 10 Schéma konstrukce tepelného anemometru	20
Obr 11 Izokinetický odběr	20
Obr 12 Kombinace S sondy odběrové hubice a termočlánu	22
Obr 13 Princip optické metody	25
Obr 14 Přístroj na měření koncentrace optickou metodou	27
Obr 15 Princip měření rozptylem světla.....	27
Obr 16 Princip radiometrické metody	28
Obr 17 Schéma zapojení triboelektrického prachoměru	29
Obr 18 Schéma prašné trati	30
Obr 19 Granulometrický rozbor popílku	32
Obr 20 Venturiho trubice	34
Obr 21 Návrh ejektoru.....	37
Obr 22 i – s diagram proudového kompresoru	38
Obr 23 Schéma odběrové aparatury	45
Obr 24 Schéma rozmístění odběrových bodů v měřicím profilu	47

Tab 1 Parametry zachycovače prachu	35
Tab 2 Parametry ventilátoru	35
Tab 3 Měřené hodnoty sledovaného média	47
Tab 4 Průměrné složení atmosférického vzduchu	48
Tab 5 Měřené hodnoty diferenčního tlaku v odběrových bodech	50
Tab 6 Výpočet rychlosti v odběrových bodech	50
Tab 7 objemové toky vzdušiny ve všech měřicích bodech	51
Tab 8 Měřené hodnoty pro výpočet hmot. koncentrace C_{TL}	52
Tab 9 Hodnoty na prašné trati	54
Tab 10 Stanovení chyby měření	54
Tab 11 Vyhodnocení hmotnostní koncentrace TZL	56
Tab 12 Vyhodnocení hmotnostního toku TZL	58
Graf 1 Rychlostní profil	51
Graf 2 Vliv ne-izokinetiky na hmotnostní koncentraci TZL	57
Graf 3 Vliv ne-izokinetiky na hmotnostní koncentraci TZL + korekce	57
Graf 4 Vliv ne-izokinetiky na hmotnostní tok TZL	59
Graf 5 Vliv ne-izokinetiky na hmotnostní tok TZL + korekce	59

Seznam příloh

Příloha 1 - Granulometrický rozbor prachu

Příloha 2 – Měření s izokinetickým poměrem 1

Příloha 3 – Měření s izokinetickým poměrem 0,5

Příloha 4 – Měření s izokinetickým poměrem 0,75

Příloha 5 – Měření s izokinetickým poměrem 1,25

Příloha 6 – Měření s izokinetickým poměrem 1,5

Příloha 7 – Měření s izokinetickým poměrem 0,95

Příloha 8 – Měření s izokinetickým poměrem 1,15

Fotodokumentace

Seznam výkresů

Výrobní výkresy ejektoru – (7 ks.)

PŘÍLOHY

Příloha 1 – Granulometrický rozbor prachu



MASTERSIZER 

Result Analysis Report

Sample Name:
vz. 610/10, prach z EO na MPZ 2010
Sample Source & type:
ATI
Sample bulk lot ref:

SOP Name:
OMYA1-VA
Measured by:
labpoma1
Result Source:
Measurement

Measured:
15. června 2010 13:18:32
Analysed:
15. června 2010 13:18:34

Particle Name:
Fraunhofer
Particle RI:
0.000
Dispersant Name:
Water

Accessory Name:
Hydro 2000G (A)
Absorption:
0
Dispersant RI:
1.330

Analysis model:
General purpose
Size range:
0.020 to 2000.000 μm
Weighted Residual:
0.138 %

Sensitivity:
Enhanced
Obscuration:
16.81 %
Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0129 %Vol
Specific Surface Area:
1.22 m^2/g

Span:
4.848
Surface Weighted Mean D[3,2]:
4.928 μm

Uniformity:
1.56
Vol. Weighted Mean D[4,3]:
25.038 μm

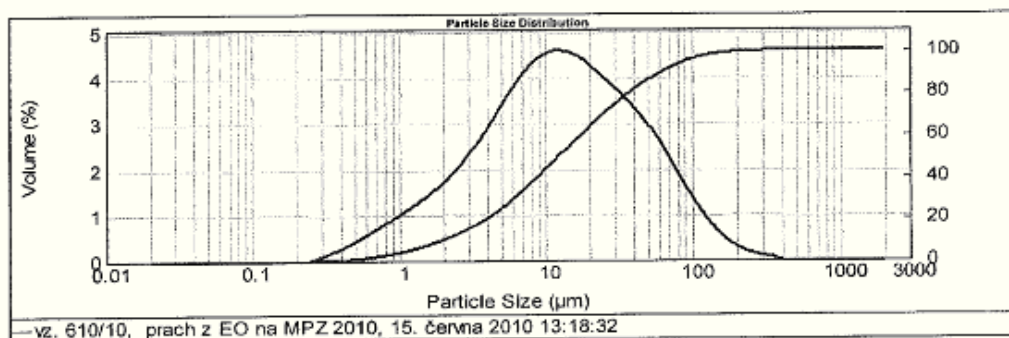
Result units:
Volume

D[0.1]: 1.996 μm

D[0.5]: 12.517 μm

D[0.9]: 62.674 μm

D[0.98]: 133.29 μm



Size (μm)	Vol Under %
0.500	0.84
0.700	2.03
1.000	3.97
2.000	10.02
5.000	24.85

Size (μm)	Vol Under %
10.000	43.28
15.000	55.42
25.000	69.83
45.000	83.78
50.000	85.91

Size (μm)	Vol Under %
63.000	90.09
71.000	91.93
90.000	94.92
100.000	95.96
125.000	97.64

Size (μm)	Vol Under %
160.000	98.80
180.000	99.16
200.000	99.40
300.000	99.88
400.000	100.00

Operator notes:

Result Analysis Report

Sample Name:
vz. 610/10, prach z EO na MPZ 2010
Sample Source & type:
ATI
Sample bulk lot ref:

SOP Name:
OMYA1-VA
Measured by:
labpoma1
Result Source:
Measurement

Measured:
15. června 2010 13:24:21
Analysed:
15. června 2010 13:24:23

Particle Name:
Fraunhofer
Particle RI:
0.000
Dispersant Name:
Water

Accessory Name:
Hydro 2000G (A)
Absorption:
0
Dispersant RI:
1.330

Analysis model:
General purpose
Size range:
0.020 to 2000.000 μm
Weighted Residual:
0.594 %

Sensitivity:
Enhanced
Obscuration:
19.21 %
Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0155 %Vol
Specific Surface Area:
1.17 m^2/g

Span :
5.089
Surface Weighted Mean D[3,2]:
5.126 μm

Uniformity:
1.63
Vol. Weighted Mean D[4,3]:
27.923 μm

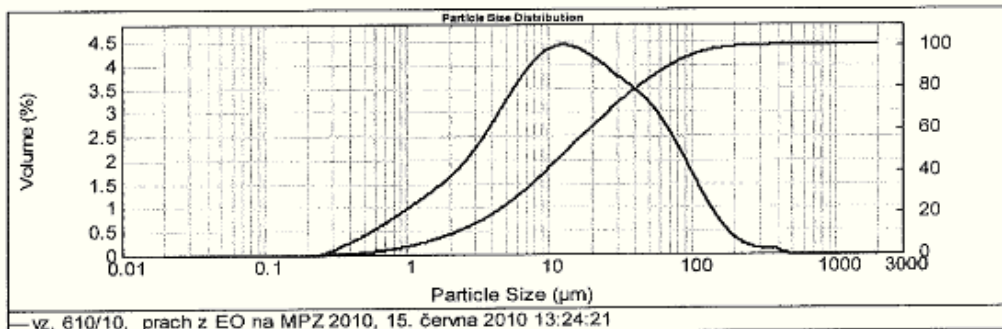
Result units:
Volume

D(0.1) : 2.071 μm

D(0.5) : 13.590 μm

D(0.9) : 71.232 μm

D(0.98) : 144.87 μm



Size (μm)	Vol Under %
0.500	0.82
0.700	1.96
1.000	3.84
2.000	9.62
5.000	23.67

Size (μm)	Vol Under %
10.000	41.19
15.000	52.84
25.000	66.83
45.000	80.94
50.000	83.21

Size (μm)	Vol Under %
63.000	87.82
71.000	89.94
90.000	93.54
100.000	94.85
125.000	97.00

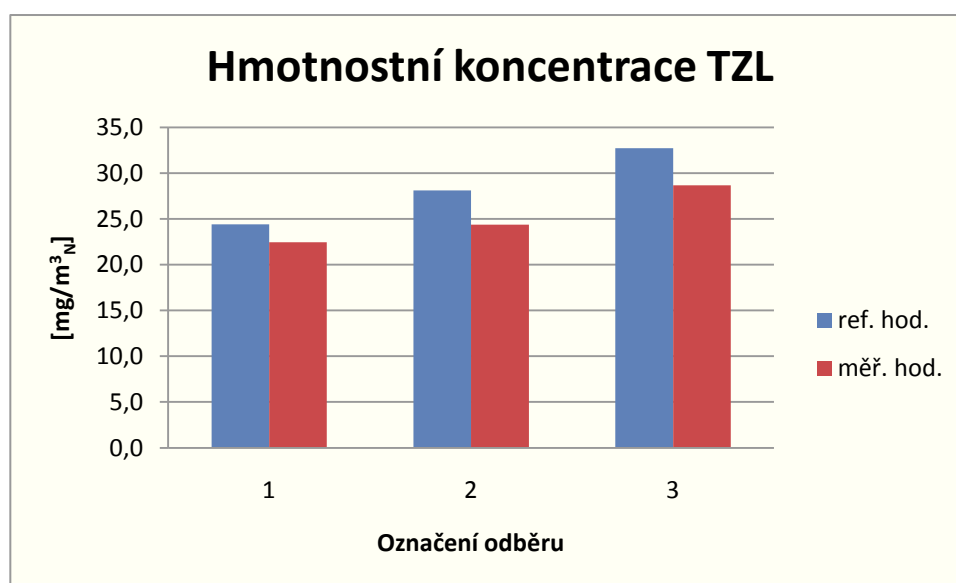
Size (μm)	Vol Under %
160.000	98.50
180.000	98.95
200.000	99.23
300.000	99.76
400.000	99.96

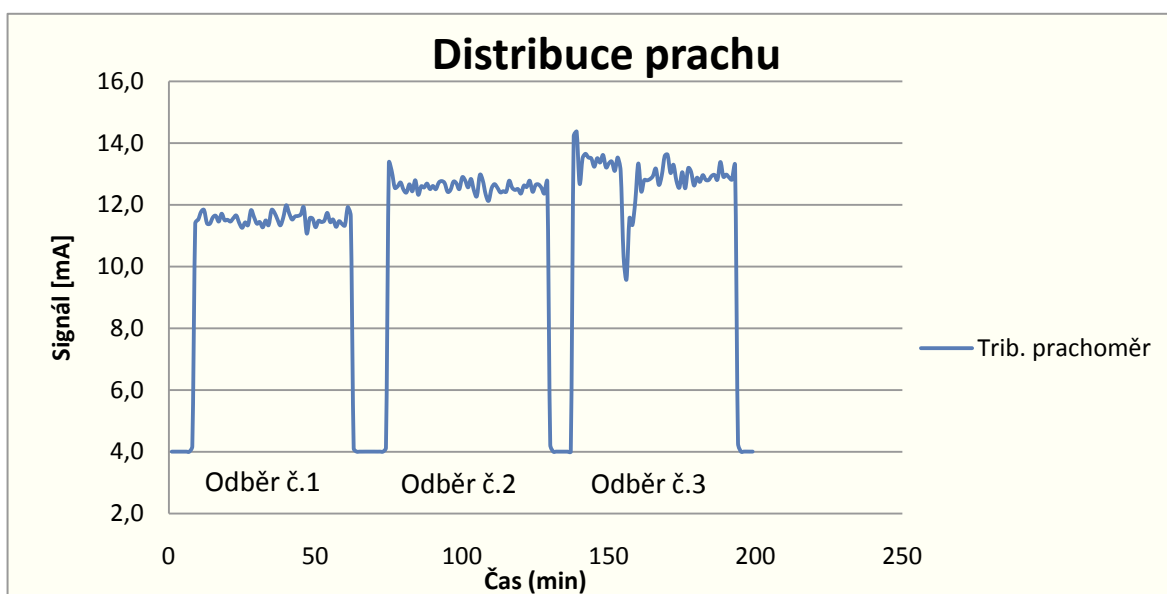
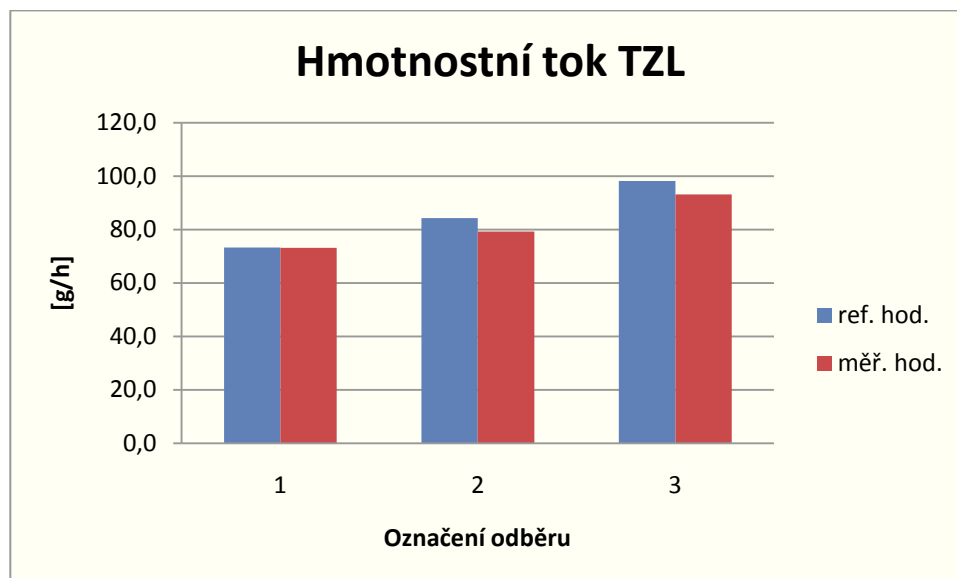
Operator notes:

Příloha 2 - Měření s izokinetickým poměrem 1

Měření 2011_04_14

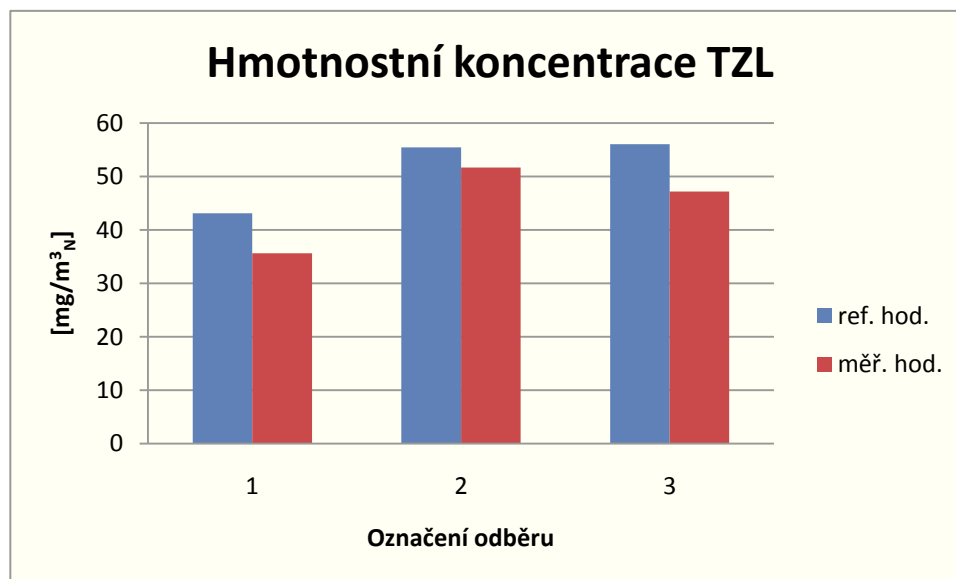
	Datum měření	rr_mm_dd	2011_04_14		
	Označení odběru	-	1	2	3
Prášná trať	Čas od	hh:mm	11:00	14:00	15:21
	Čas do	hh:mm	11:54	14:55	16:17
	izokinetický poměr	-	1	1	1
	Doba dávkování τ	min	54	55	56
	Průtok vzdušiny Q_N	m^3_N/h	3000	3000	3000
	Nadávkovaný prach m	g	65,9	77,3	91,6
	Hmotnostní koncentrace C_{ref}	mg/m^3_N	24,4	28,1	32,7
	Hmotnostní tok m_{tok}	g/h	73,2	84,3	98,1
Tuháská apar.	Objemový tok vzdušiny V_N	m^3_N/h	3256,0	3250,8	3246,5
	Navážka Δm	mg	198,6	215,3	252,4
	Odebraný objem vzorku V_{vz}^V	m^3_N	8,842	8,834	8,800
	Hmotnostní koncentrace C_{TL}	mg/m^3_N	22,5	24,4	28,7
	Hmotnostní tok q_{TL}	g/h	73,1	79,2	93,1
Chyba měř.	Abs. chyba hmot. koncentrace ε	mg/m^3_N	-1,95	-3,74	-4,03
	Rel. chyba hmot. koncentrace δ	%	-7,97	-13,30	-12,33
	Abs. chyba hmotnostní tok ε	g/h	-0,09	-5,10	-5,03
	Rel. chyba hmotnostní tok δ	%	-0,12	-6,05	-5,12

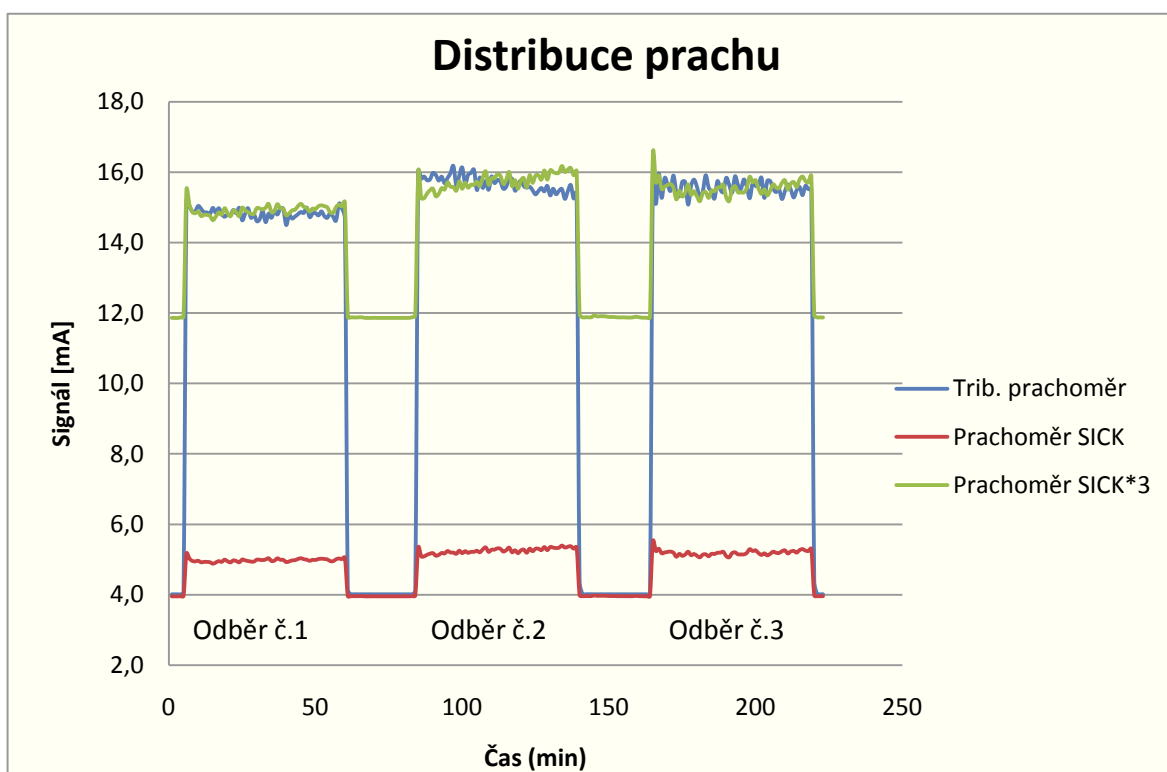
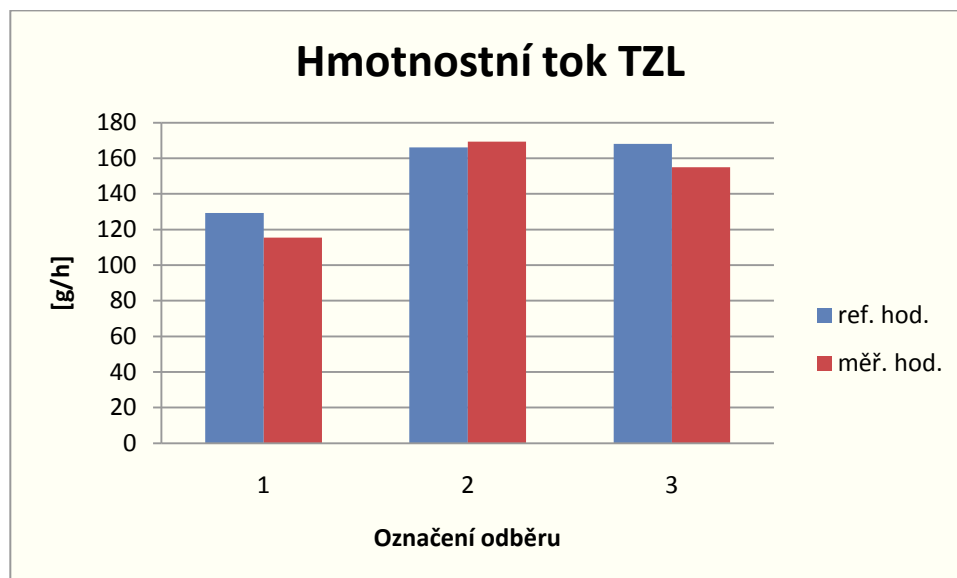




Měření 2011_04_15

	Datum měření	rr_mm_dd	2011_04_15		
	Označení odběru	-	1	2	3
Prašná trať	Čas od	hh:mm	10:00	12:20	13:40
	Čas do	hh:mm	11:05	13:15	14:35
	izokinetický poměr	-	1	1	1
	Doba dávkování τ	min	55	55	55
	Průtok vzdušiny Q_N	m^3_N/h	3000	3000	3000
	Nadávkový prach m	g	118,4	152,3	154,1
	Hmotnostní koncentrace C_{ref}	mg/m^3_N	43,1	55,4	56
	Hmotnostní tok m_{tok}	g/h	129,2	166,1	168,1
Tuhá škála apar.	Objemový tok vzdušiny V_N	m^3_N/h	3241	3276	3287,8
	Navážka Δm	mg	313,9	459,9	418,3
	Odebraný objem vzorku V_{vz}^V	m^3_N	8,815	8,901	8,871
	Hmotnostní koncentrace C_{TL}	mg/m^3_N	35,6	51,7	47,2
	Hmotnostní tok q_{TL}	g/h	115,4	169,3	155,0
Chyba měř.	Abs. chyba hmot. koncetrace ϵ	mg/m^3_N	-7,49	-3,73	-8,85
	Rel. chyba hmot. koncetrace δ	%	-17,38	-6,74	-15,80
	Abs. chyba hmotnostní tok ϵ	g/h	-13,79	3,17	-13,07
	Rel. chyba hmotnostní tok δ	%	-10,67	1,91	-7,77

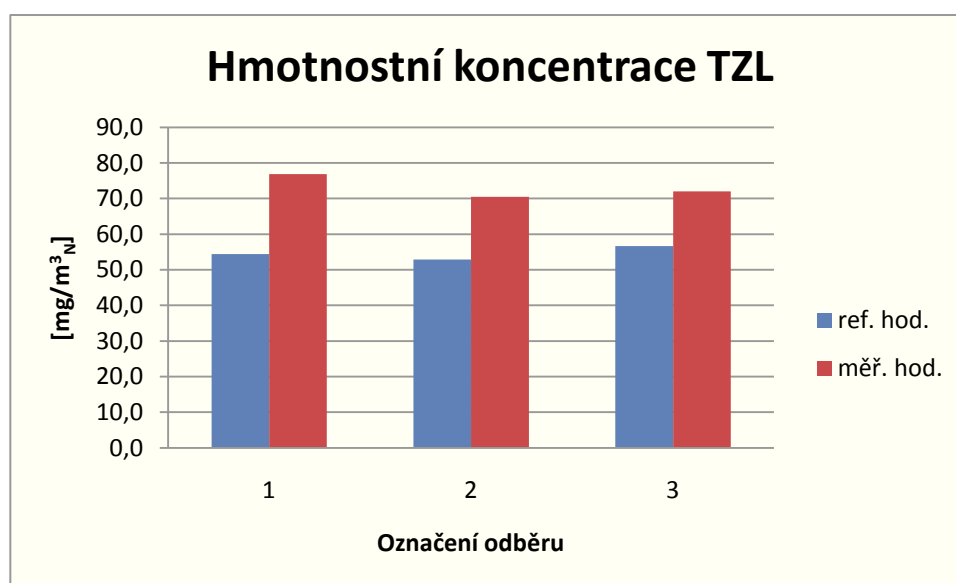


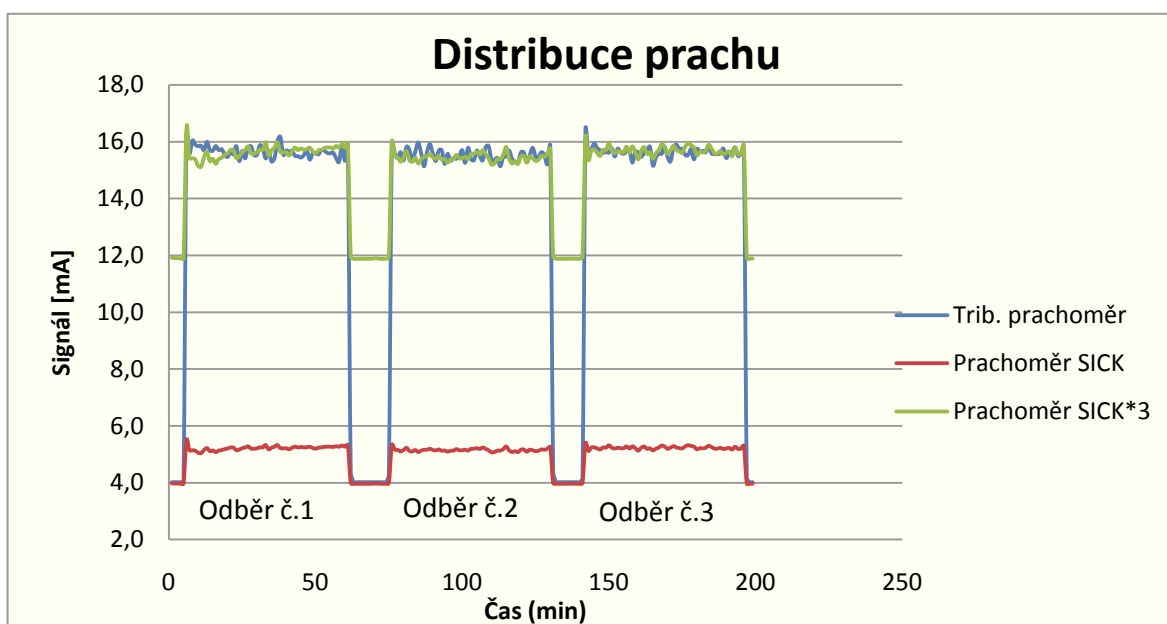
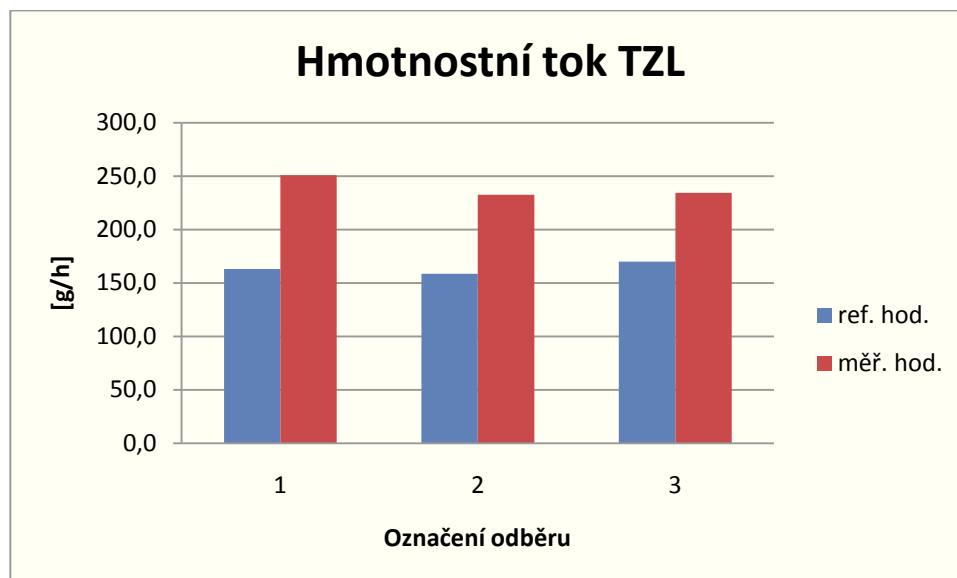


Příloha 3 – Měření s izokinetickým poměrem 0,5

Měření 2011_04_19

	Datum měření	rr_mm_dd	2011_04_19		
	Označení odběru	-	1	2	3
Prášná trať	Čas od	hh:mm	8:50	10:14	12:30
	Čas do	hh:mm	9:46	11:09	13:25
	izokinetický poměr	-	0,5	0,5	0,5
	Doba dávkování τ	min	56	55	55
	Průtok vzdušiny Q_N	m^3_N/h	3000	3000	3000
	Nadávkováný prach m	g	152,2	145,4	155,7
	Hmotnostní koncentrace C_{ref}	mg/m^3_N	54,4	52,9	56,6
	Hmotnostní tok m_{tok}	g/h	163,1	158,6	169,9
Tuháská apar.	Objemový tok vzdušiny V_N	m^3_N/h	3264,7	3299,2	3254,4
	Navážka Δm	mg	657,2	607,3	612
	Odebraný objem vzorku V_{vz}^V	m^3_N	8,551	8,619	8,502
	Hmotnostní koncentrace C_{TL}	mg/m^3_N	76,9	70,5	72,0
	Hmotnostní tok q_{TL}	g/h	250,9	232,5	234,3
Chyba měř.	Abs. chyba hmot. koncentrace ε	mg/m^3_N	22,50	17,59	15,36
	Rel. chyba hmot. koncentrace δ	%	41,39	33,26	27,14
	Abs. chyba hmotnostní tok ε	g/h	87,84	73,85	64,41
	Rel. chyba hmotnostní tok δ	%	53,87	46,56	37,92

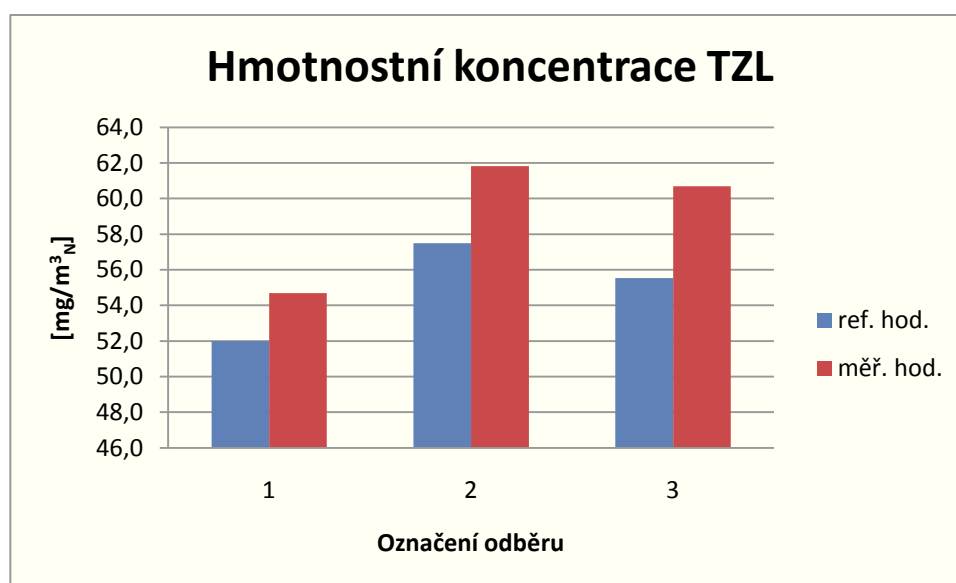


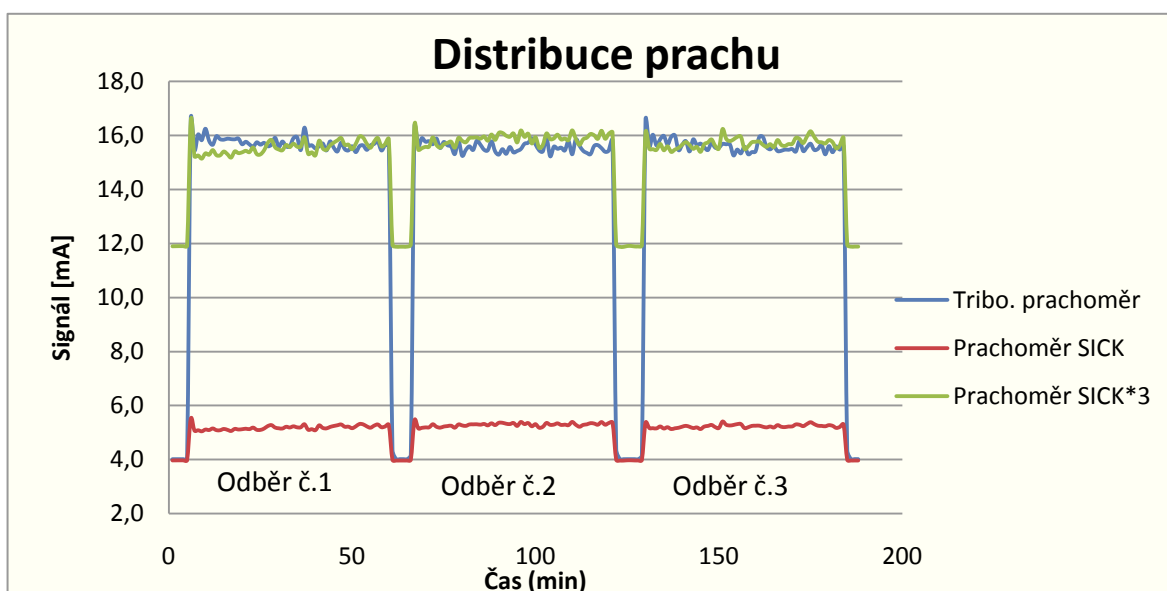
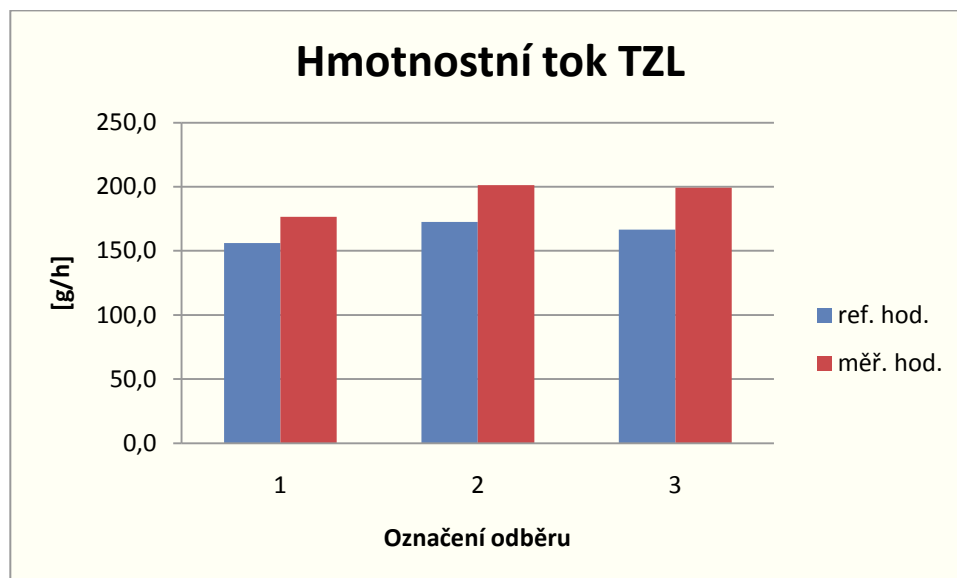


Příloha 4 – Měření s izokinetickým poměrem 0,75

Měření 2011_04_20

	Datum měření	rr_mm_dd	2011_04_20		
	Označení odběru	-	1	2	3
Prášná trať	Čas od	hh:mm	8:44	10:06	12:20
	Čas do	hh:mm	9:39	11:01	13:15
	izokinetický poměr	-	0,75	0,75	0,75
	Doba dávkování τ	min	55	55	55
	Průtok vzdušiny Q_N	m^3_N/h	3000	3000	3000
	Nadávkovaný prach m	g	143	158,1	152,7
	Hmotnostní koncentrace C_{ref}	mg/m^3_N	52,0	57,5	55,5
	Hmotnostní tok m_{tok}	g/h	156,0	172,5	166,6
Tuháská apar.	Objemový tok vzdušiny V_N	m^3_N/h	3229,2	3255,9	3283
	Navážka Δm	mg	489,9	561,2	553,1
	Odebraný objem vzorku V_{vz}^V	m^3_N	8,958	9,077	9,113
	Hmotnostní koncentrace C_{TL}	mg/m^3_N	54,7	61,8	60,7
	Hmotnostní tok q_{TL}	g/h	176,6	201,3	199,3
Chyba měř.	Abs. chyba hmot. koncentrace ε	mg/m^3_N	2,69	4,34	5,17
	Rel. chyba hmot. koncentrace δ	%	5,17	7,54	9,30
	Abs. chyba hmotnostní tok ε	g/h	20,60	28,83	32,67
	Rel. chyba hmotnostní tok δ	%	13,21	16,71	19,61

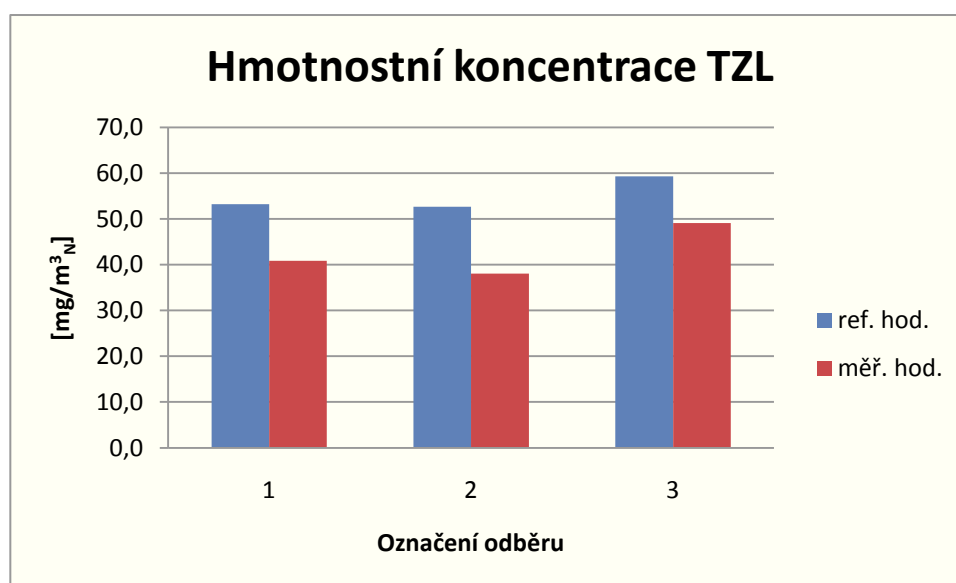


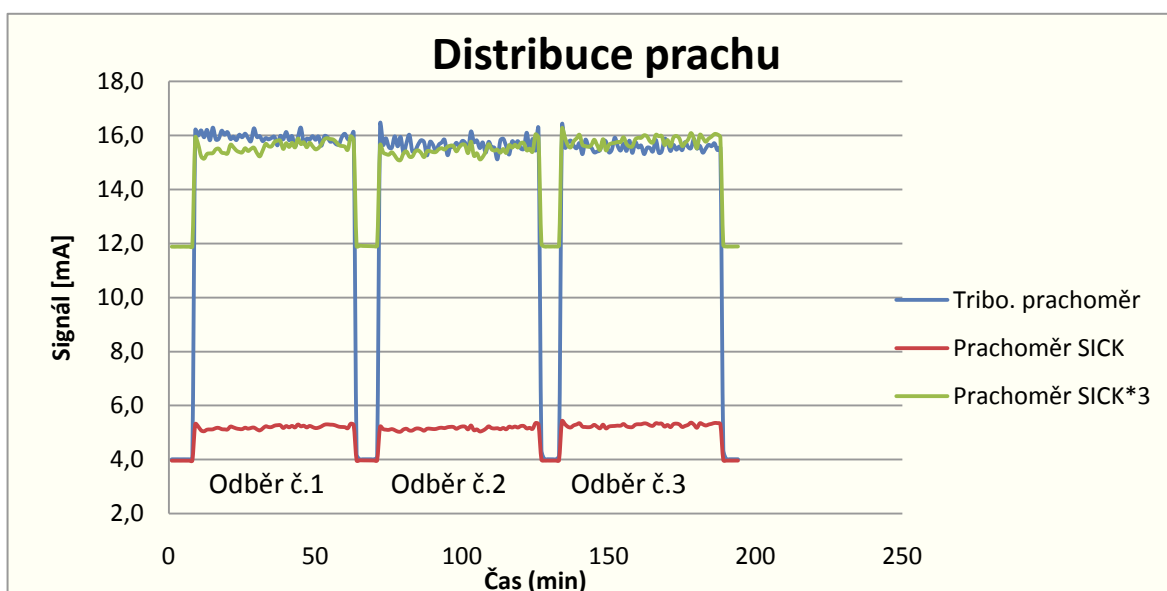
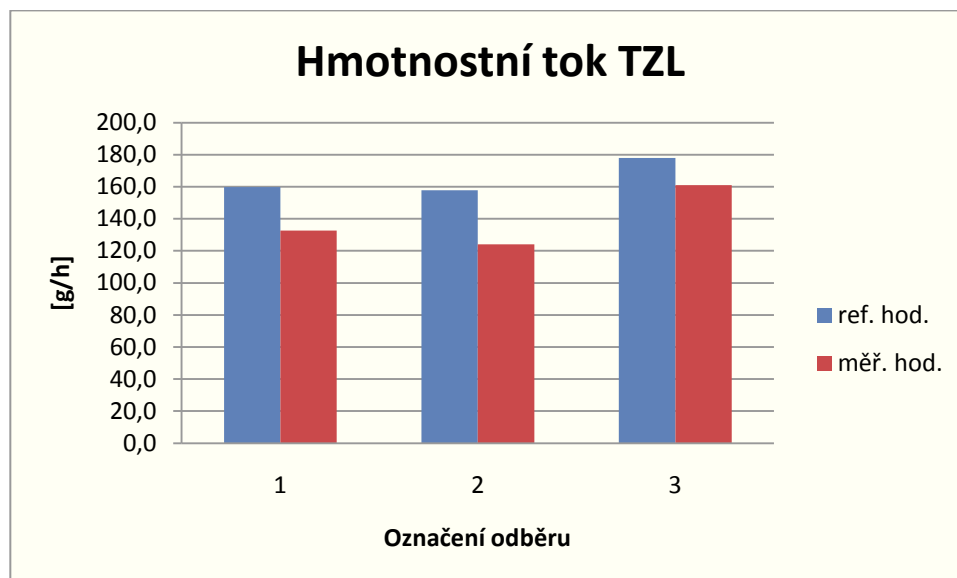


Příloha 5 – Měření s izokinetickým poměrem 1,25

Měření 2011_04_21

	Datum měření	rr_mm_dd	2011_04_21		
	Označení odběru	-	1	2	3
Prášná trať	Čas od	hh:mm	8:48	11:09	13:19
	Čas do	hh:mm	9:43	12:04	14:14
	izokinetický poměr	-	1,25	1,25	1,25
	Doba dávkování τ	min	55	55	55
	Průtok vzdušiny Q_N	m^3_N/h	3000	3000	3000
	Nadávkový prach m	g	146,4	144,7	163,1
	Hmotnostní koncentrace C_{ref}	mg/m^3_N	53,2	52,6	59,3
	Hmotnostní tok m_{tok}	g/h	159,7	157,9	177,9
Tuhá šlá apar.	Objemový tok vzdušiny V_N	m^3_N/h	3250,7	3261,6	3277,6
	Navážka Δm	mg	314,4	293,4	380,6
	Odebraný objem vzorku V_{vz}^V	m^3_N	7,7	7,71	7,752
	Hmotnostní koncentrace C_{TL}	mg/m^3_N	40,8	38,1	49,1
	Hmotnostní tok q_{TL}	g/h	132,7	124,1	160,9
Chyba měř.	Abs. chyba hmot. koncentrace ε	mg/m^3_N	-12,41	-14,56	-10,21
	Rel. chyba hmot. koncentrace δ	%	-23,30	-27,68	-17,22
	Abs. chyba hmotnostní tok ε	g/h	-26,98	-33,74	-17,01
	Rel. chyba hmotnostní tok δ	%	-16,89	-21,37	-9,56

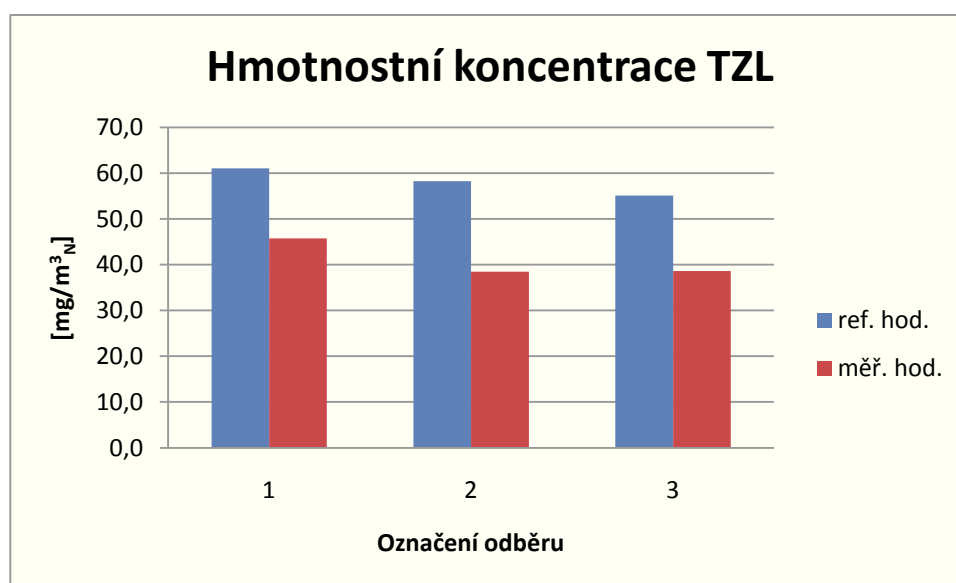


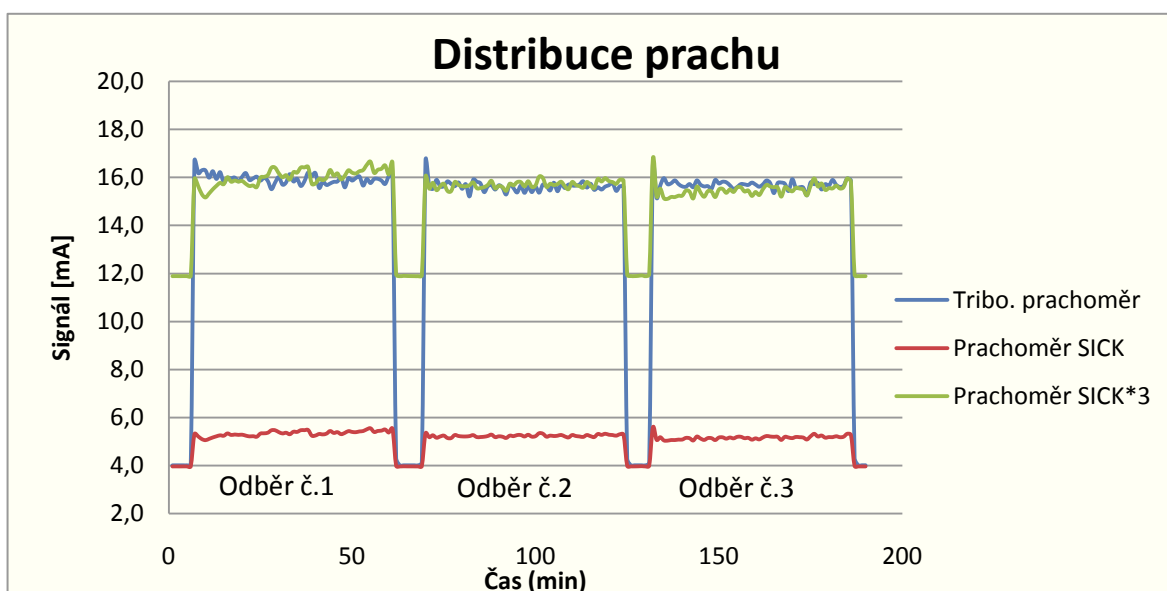
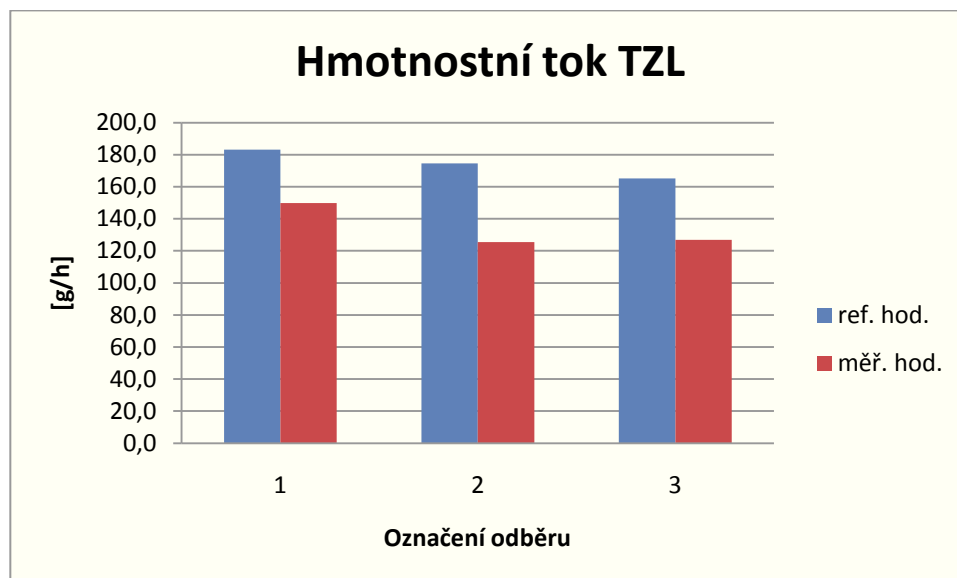


Příloha 6 – Měření s izokinetickým poměrem 1,5

Měření 2011_04_22

Datum měření		rr_mm_dd	2011_04_22		
Označení odběru		-	1	2	3
Prášná trať	Čas od	hh:mm	11:10	12:59	14:15
	Čas do	hh:mm	12:05	13:54	15:10
	izokinetický poměr	-	1,5	1,5	1,5
	Doba dávkování τ	min	55	55	55
	Průtok vzdušiny Q_N	m^3_N/h	3000	3000	3000
	Nadávkový prach m	g	167,9	160,1	151,5
	Hmotnostní koncentrace C_{ref}	mg/m^3_N	61,1	58,2	55,1
	Hmotnostní tok m_{tok}	g/h	183,2	174,7	165,3
Tuháská apar.	Objemový tok vzdušiny V_N	m^3_N/h	3277,2	3260,1	3289,5
	Navážka Δm	mg	425,1	356,2	359,7
	Odebraný objem vzorku V_{vz}^V	m^3_N	9,301	9,261	9,323
	Hmotnostní koncentrace C_{TL}	mg/m^3_N	45,7	38,5	38,6
	Hmotnostní tok q_{TL}	g/h	149,8	125,4	126,9
Chyba měř.	Abs. chyba hmot. koncentrace ε	mg/m^3_N	-15,35	-19,76	-16,51
	Rel. chyba hmot. koncentrace δ	%	-25,14	-33,93	-29,97
	Abs. chyba hmotnostní tok ε	g/h	-33,38	-49,26	-38,36
	Rel. chyba hmotnostní tok δ	%	-18,22	-28,21	-23,21

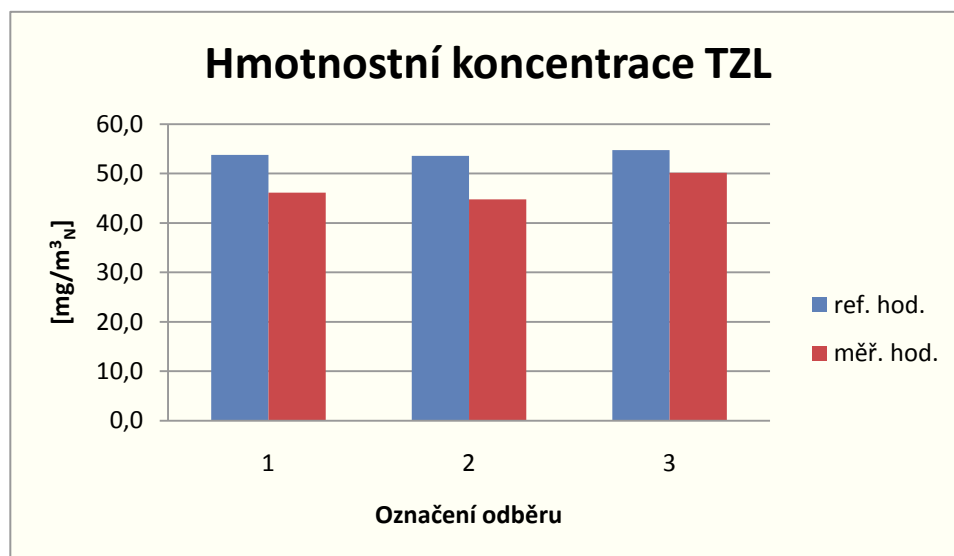


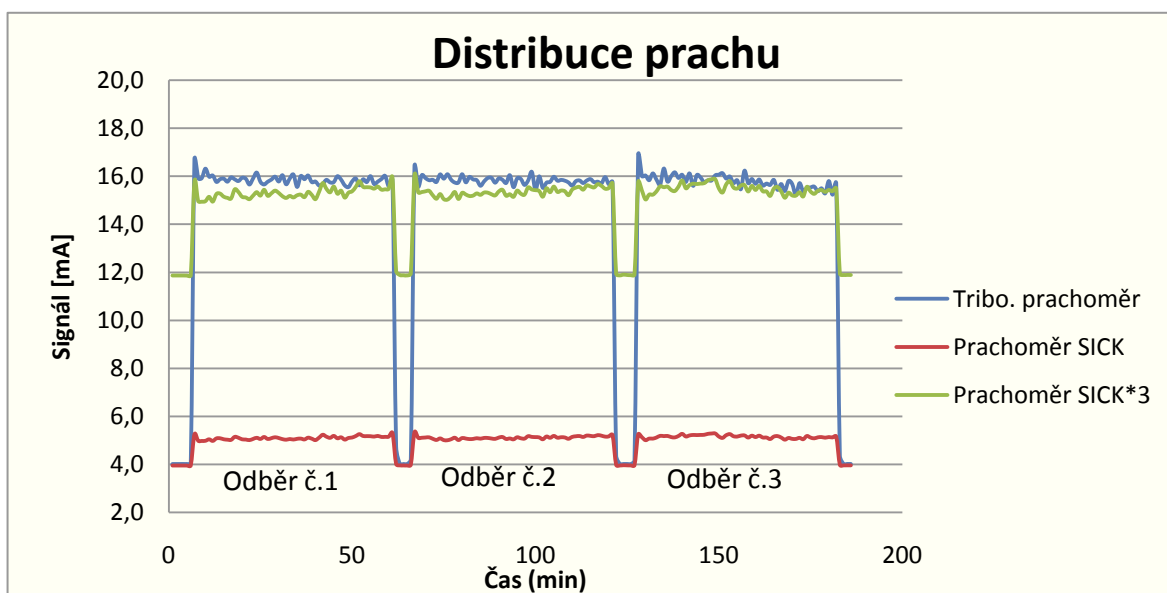
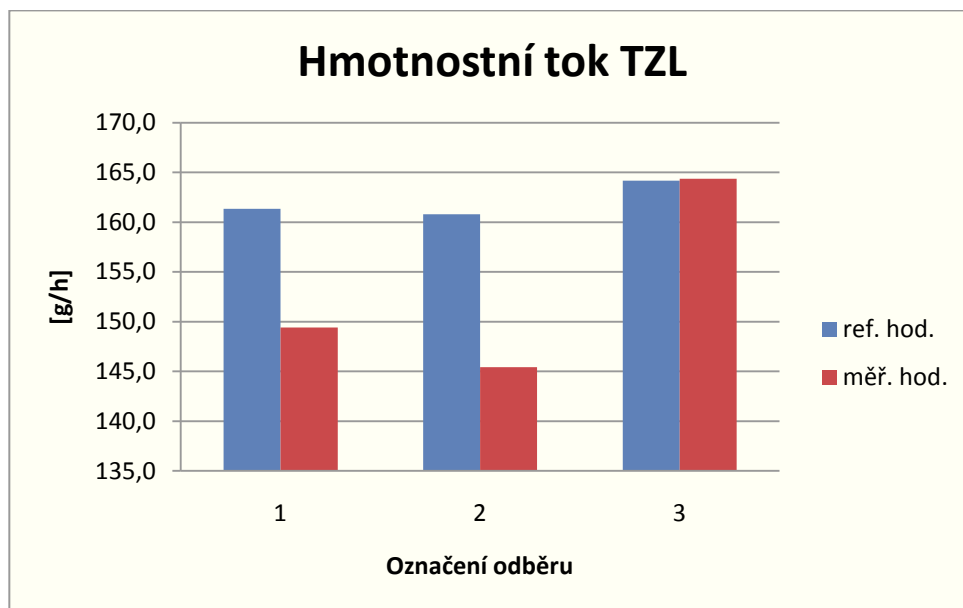


Příloha 7 – Měření s izokinetickým poměrem 0,95

Měření 2011_04_27

	Datum měření	rr_mm_dd	2011_04_27		
	Označení odběru	-	1	2	3
Prašná trať	Čas od	hh:mm	9:14	10:45	12:54
	Čas do	hh:mm	10:09	11:40	13:49
	izokinetický poměr	-	0,95	0,95	0,95
	Doba dávkování τ	min	55	55	55
	Průtok vzdušiny Q_N	m^3_N/h	3000	3000	3000
	Nadávkovaný prach m	g	147,9	147,4	150,5
	Hmotnostní koncentrace C_{ref}	mg/m^3_N	53,8	53,6	54,7
	Hmotnostní tok m_{tok}	g/h	161,3	160,8	164,2
Tuhá apar.	Objemový tok vzdušiny V_N	m^3_N/h	3238,1	3250,6	3276,5
	Navážka Δm	mg	393,5	374,9	423,2
	Odebraný objem vzorku V_{vz}^V	m^3_N	8,527	8,379	8,437
	Hmotnostní koncentrace C_{TL}	mg/m^3_N	46,1	44,7	50,2
	Hmotnostní tok q_{TL}	g/h	149,4	145,4	164,3
Chyba měř.	Abs. chyba hmot. koncetrace ϵ	mg/m^3_N	-7,63	-8,86	-4,57
	Rel. chyba hmot. koncetrace δ	%	-14,19	-16,52	-8,35
	Abs. chyba hmotnostní tok ϵ	g/h	-11,92	-15,36	0,17
	Rel. chyba hmotnostní tok δ	%	-7,38	-9,55	0,10
Oplach	Celkový odebrany oběm vz. V_{vz}^V	m^3_N	25,343		
	Hmotnost oplachu m_{opl}	mg	12,5		
	Celková hmotnost navážky Δm	mg	1191,6		
	Poměr oplachu k navážce	%	1,05		

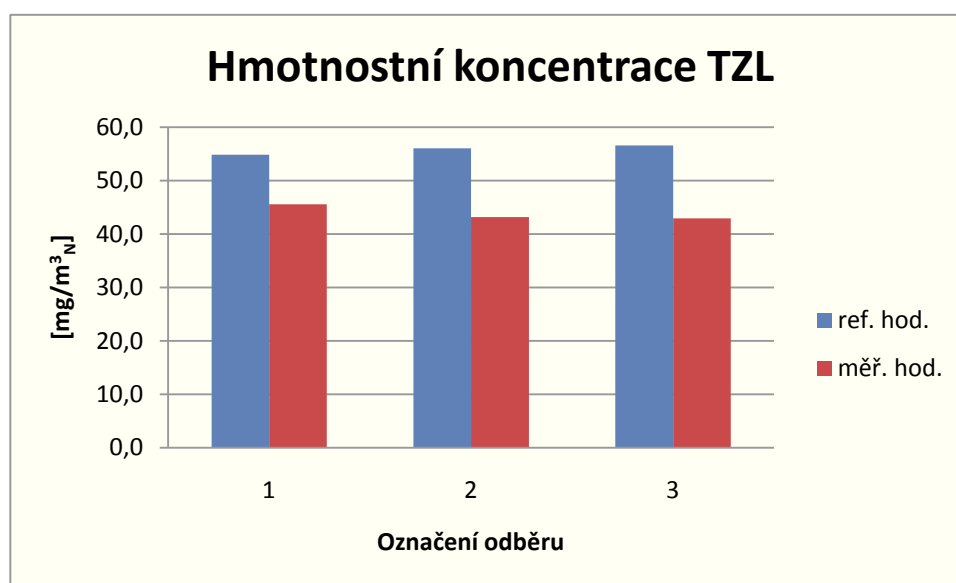


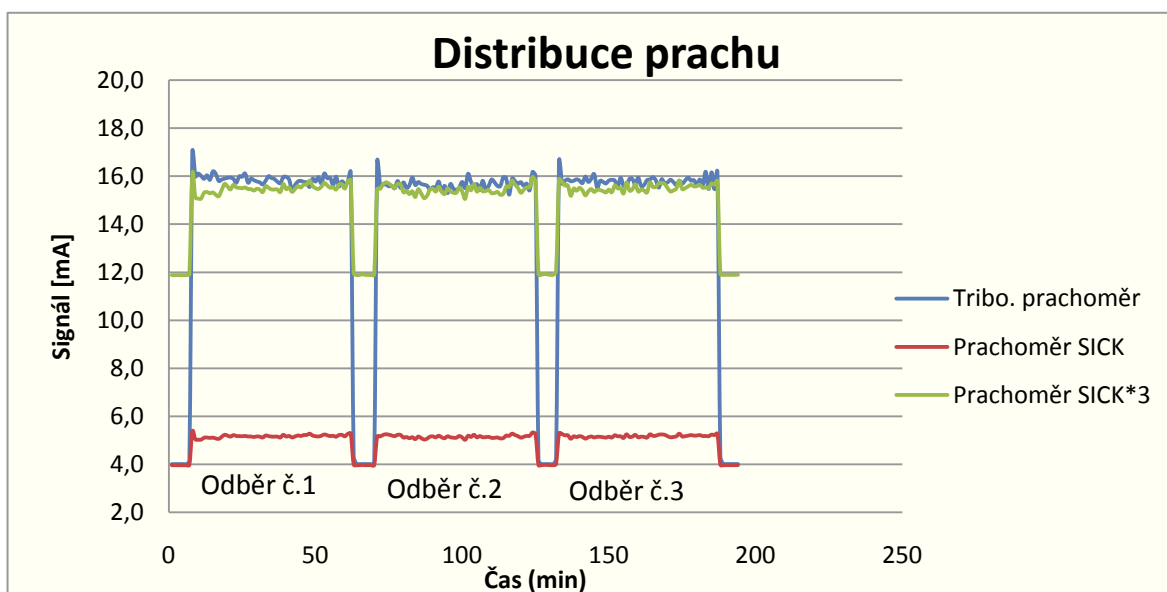
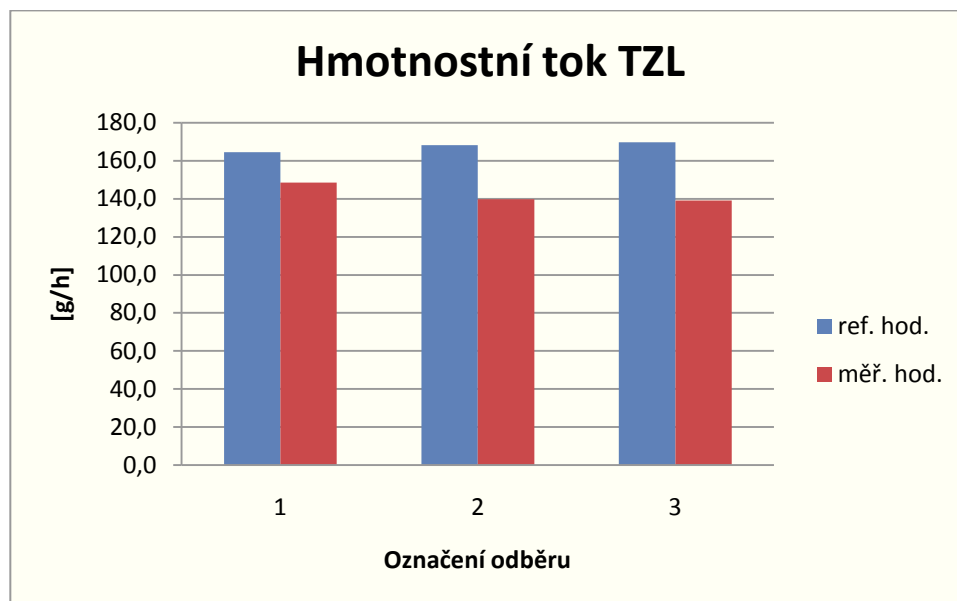


Příloha 8 – Měření s izokinetickým poměrem 1,15

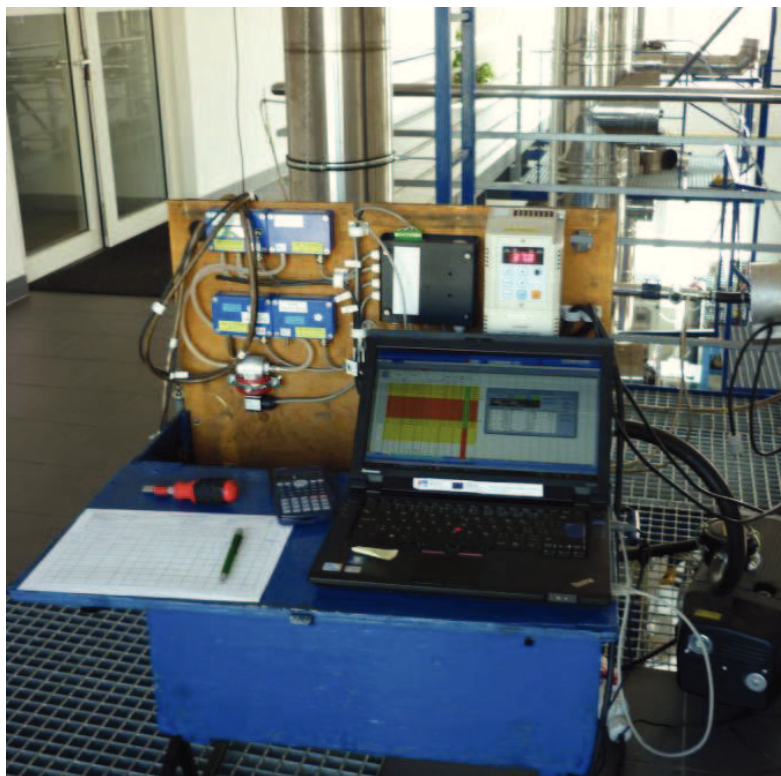
Měření 2011_04_28

	Datum měření	rr_mm_dd	2011_04_28		
	Označení odběru	-	1	2	3
Prašná trať	Čas od	hh:mm	8:32	9:55	11:09
	Čas do	hh:mm	9:27	10:50	12:04
	izokinetický poměr	-	1,15	1,15	1,15
	Doba dávkování τ	min	55	55	55
	Průtok vzdušiny Q_N	m^3_N/h	3000	3000	3000
	Nadávkovaný prach m	g	150,8	154,1	155,6
	Hmotnostní koncentrace C_{ref}	mg/m^3_N	54,8	56,0	56,6
	Hmotnostní tok m_{tok}	g/h	164,5	168,1	169,7
Tuhá ška apar.	Objemový tok vzdušiny V_N	m^3_N/h	3260	3235,3	3240,5
	Navážka Δm	mg	464,9	437,3	434,2
	Odebraný objem vzorku V_{vz}^V	m^3_N	10,201	10,128	10,118
	Hmotnostní koncentrace C_{TL}	mg/m^3_N	45,6	43,2	42,9
	Hmotnostní tok q_{TL}	g/h	148,6	139,7	139,1
Chyba měř.	Abs. chyba hmot. koncentrace ε	mg/m^3_N	-9,26	-12,86	-13,67
	Rel. chyba hmot. koncentrace δ	%	-16,89	-22,95	-24,16
	Abs. chyba hmotnostní tok ε	g/h	-15,94	-28,42	-30,68
	Rel. chyba hmotnostní tok δ	%	-9,69	-16,90	-18,08
Oplach	Celkový odebrany oběm vz. V_{vz}^V	m^3_N	30,447		
	Hmotnost oplachu m_{opl}	mg	3,6		
	Celková hmotnost navážky Δm	mg	1336,4		
	Poměr oplachu k navážce	%	0,27		





Fotodokumentace



Měřicí tuhařská aparatura



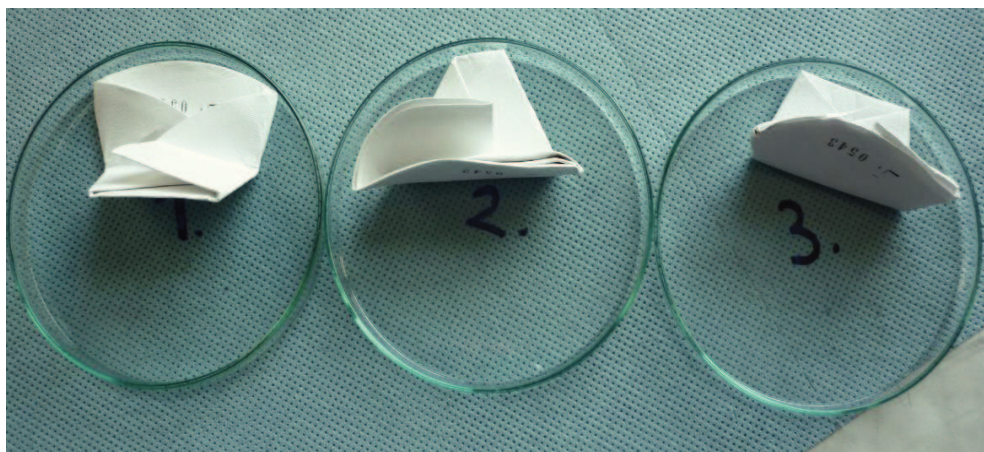
Vkládání nového filtru do zachycovače



Zachycovač



Exponovaný filtr



Exponované filtry před vysušením



Sušárna



Exsikátor a váha



Kombinovaná odběrová sonda



Oplach sondy



Výsledný oplach před vysušením